TABLE DES MATIERES.

Pages

Résumé des résultats antérieurs

Description détaillée des appareils

RECHERCHES SUR L'ATMOSPHÈRE SOLAIRE ET APPAREILS ENREGISTREURS DES COUCHES DE VAPEURS SUPERPOSÉES QUI LA COMPOSENT,

Par M. H. DESLANDRES

Dans l'état actuel des recherches solaires, le fait dominant est la reconnaissance journalière de la chromosphère et de toutes ses couches de vapeurs, dans la demi-sphère entière qui est tournée vers la Terre.

Jusqu'à l'année 1892, la chromosphère, qui est formée par toutes les couches basses, principalement gazeuses, de l'atmosphère, a été connue d'une manière très incomplète, son étude était limitée à la partie qui se présente à nous extérieurement au bord solaire, partie qui a été découverte dans les éclipses totales et est relevée journellement avec l'œil depuis 1868 par la méthode de Janssen et Lockyer. La partie beaucoup plus étendue, en projection cent fois plus grande, qui est interposée entre la Terre et le disque, était inaccessible à l'observation. Or cette partie importante, intérieure au bord, est décelée actuellement par la Photographie aussi facilement que la chromosphère extérieure et les protubérances. Même la méthode nouvelle s'applique aux vapeurs très basses de l'atmosphère (formant ce qu'on appelle la couche renversante), qui font une saillie trop faible au bord extérieur, pour être visibles en temps ordinaire. La méthode est très générale et s'applique à toutes les vapeurs qui donnent une raie d'émission où d'absorption, et aussi aux différentes couches d'une même vapeur qui se distinguent par des largeurs différentes de la même raie.

Ce résultat, obtenu dans ses grandes lignes de 1892 à 1894, est dû à l'étude méthodique du spectre solaire photographique et à l'emploi de spectrographes enregistreurs spéciaux, qui, en isolant une raie solaire, donnent les formes et les mouvements radiaux de la vapeur correspondante.

Ces études spectrales et ces appareils enregistreurs ont été organisés d'abord dans un petit nombre d'observatoires, à Chicago et Paris par Hale et Deslandres, et aussi dans l'observatoire privé

d'Evershed. Puis, en raison de l'importance toujours croissante de ces recherches, l'exemple a été suivi récemment par les observatoires de South Kensington, de Kodaikanal aux Indes, Potsdam, Tortose, etc.

J'ai reçu plusieurs demandes de renseignements sur les appareils enregistreurs que j'ai organisés à Paris et transportés en 1898 à l'observatoire de Meudon, et dont j'ai donné une description générale dans plusieurs recueils. Je suis conduit à publier une description très détaillée de ces appareils, avec dessins et planches en héliogravure.

Un de leurs caractères principaux est d'avoir été réalisés avec de faibles moyens. La lumière leur est fournie par un sidérostat du type Foucault ou du type polaire et par des objectifs ou miroirs concaves d'ouverture relativement petite. Les spectrographes eux-mêmes sont simples, la dépense ayant été réduite au minimum. Leur principal mérite est d'être en service depuis plus de douze ans, et d'avoir la sanction d'un long emploi. D'ailleurs, à diverses reprises, j'ai présenté les projets d'une organisation beaucoup plus large et d'appareils plus complets, mieux appropriés à certaines recherches, et en particulier disposés pour un enregistrement entièrement continu, mais le manque de ressources ne m'a pas permis de les mettre à exécution. Ceux de ces projets qui paraissent dignes d'être maintenus seront rappelés brièvement.

Je commencerai par un résumé général de mes recherches personnelles sur la question, recherches qui ont été poursuivies sans interruption depuis 1891, et dont les résultats sont disséminés dans plusieurs Mémoires et dans plusieurs recueils. L'exposé des étapes successives dans la progression des idées, des découvertes et des appareils permettra au lecteur de mieux comprendre le but de l'organisation adoptée, puis, dans un chapitre final, j'exposerai mes idées personnelles sur l'organisation future de ces recherches et sur les points du sujet encore en discussion.

RÉSUMÉ DES RÉSULTATS ANTÉRIEURS

Reconnaissance des vapeurs du calcium au-dessus des facules. Spectrographes enregistreurs. — Au début de ces recherches, en 1891, la chromosphère projetée sur le disque

était encore inaccessible à l'observation. Il faut cependant faire une exception : 1° pour les radiations brillantes fortes de l'hydrogène émises par les voiles roses de certaines taches, 2° pour les radiations brillantes H et K du calcium, découvertes avec l'œil par Young, d'abord sur tout le bord extérieur, et ensuite, d'après ses propres expressions, sur les taches et leur voisinage immédiat.

Cette observation de raies gazeuses portait sur une très petite portion du disque, et sans décider si les vapeurs correspondantes se trouvaient au-dessus ou au-dessous de la surface de l'astre, et appartenaient à la chromosphère.

Or, en 1891 et 1892, j'ai reconnu que les vapeurs du calcium projetées sur le disque sont aisément décelées non seulement au-dessus des taches mais au-dessus des facules par des raies brillantes intenses du spectre photographique, qui se détachent sur les larges raies noires H et K, et, de plus, sont doubles, étant séparées par une petite raie noire centrale de renversement. Ce résultat a été obtenu avec un simple spectrographe ordinaire, le sidérostat de Foucault de l'Observatoire de Paris, et un miroir concave de 0m,20. En le présentant, j'ai recommandé l'emploi de spectrographes spéciaux à deux fentes et à mouvements automatiques (appelés communément *spectrohéliographes*) pour isoler la raie brillante, et enregistrer à la fois ou séparément les formes et les vitesses radiales des vapeurs, non seulement au bord solaire extérieur, mais dans la demi-sphère entière tournée vers la Terre. [Voir *Recherches nouvelles sur l'atmosphère solaire* (*Comptes rendus*, t. CXIII, p. 307, août 1891, t. CXIV, 8 février 1892).]

Ces appareils, dont le principe était d'ailleurs déjà connu, sont proposés d'après le plan général suivant (août 1891) : le spectrographe est mobile perpendiculairement à l'axe optique de l'objectif astronomique qui projette sur la fente du collimateur ou première fente une image réelle du Soleil, et, dans le plan du spectre, on place une seconde fente qui isole la raie de la vapeur, et derrière cette fente une plaque photographique mobile dont le mouvement est proportionnel à celui du spectrographe. Si l'on donne un mouvement lent et continu au spectrographe, on obtient la photographie des formes ou l'image même de la vapeur.

Pour les vitesses, la seconde fente, plus large, isole, outre la raie brillante, une petite portion du spectre continu voisin, et le mou-

vement n'est plus continu, mais discontinu, formé de déplacements rapides égaux, que séparent des arrêts eux-mêmes égaux L'appareil juxtapose les spectres de sections successives nombreuses et équidistantes, sur le disque entier du Soleil

La méthode nouvelle, appliquée en mars 1892, toujours avec le spectrographe ordinaire, au disque entier, décèle une série continue de vapeurs, qui, entourant et précédant une tache, forment dans l'atmosphère solaire un véritable anneau, parallèle à l'équateur (Voir *Comptes rendus,* t CXIV, p 578 et aussi p 222 et aussi t CXVI, p 126)

Au même moment (*Astronomy and Astronomy Physics*), Hale obtenait des résultats analogues, mais avec un appareil différent, avec un spectrographe automatique des formes (appelé par lui *spectrohéliographe*) et réalisé à Chicago au commencement de 1892 Le spectrohéliographe était fixé directement à la lunette d'un équatorial ordinaire, l'objectif astronomique ayant 0m,30 d'ouverture Après avoir isolé la raie brillante K des protubérances avec la seconde fente, il annonce que son appareil décèle des plages brillantes non seulement au bord extérieur, mais sur le disque lui-même, et que ces plages sont identiques aux facules de la surface solaire, les vapeurs correspondantes étant confondues avec les facules elles-mêmes (d'où le nom de *photographies des facules* donné aux nouvelles images (*Astronomy and Astrophysics,* 1892 et 1893)

Enregistrement continu de tous les éléments variables du Soleil — De mon côté, en 1893, après avoir observé une éclipse totale du Soleil au Sénégal, je présente un programme général de recherches solaires que je résume dans la formule simple suivante *Il faut enregistrer d'une manière continue tous les éléments variables du Soleil,* et je commence l'organisation des deux spectrographes enregistreurs des formes et des vitesses des vapeurs précédentes, avec un crédit de 5000fr accordé par le Ministère de l'Instruction publique, et réclamé depuis 1891, car la chromosphère est une des parties du Soleil qui a les variations les plus grandes [Voir *Sur l'Enregistrement des éléments variables du Soleil* (*Comptes rendus,* t CXVII, 1893, p 716 et 1053)]

En même temps, dans ces Notes et les deux suivantes (*Comptes

rendus, t. CXVIII, p. 842 et 1312), je précise et je complète les résultats de 1892.

Reconnaissance de la chromosphère entière du Soleil. Relations avec les facules. Comparaison avec le phénomène de l'électricité atmosphérique terrestre. — 1° Lorsqu'on emploie un spectrographe ordinaire puissant, de bonne qualité et avec certaines précautions, les raies brillantes doubles du calcium se présentent non seulement au-dessus des taches et facules, c'est-à-dire sur certaines régions privilégiées, mais sur la surface entière du disque, même les raies doubles, toujours nettes et bien dédoublées près du bord à l'intérieur, sont prolongées exactement, sans solution de continuité, par les raies doubles extérieures du calcium, lesquelles, comme on sait, décèlent et représentent la chromosphère elle-même, d'où cette conclusion nécessaire : *Les images du calcium, obtenues par l'isolement de la raie brillante avec le spectrographe des formes, représentent la chromosphère entière du Soleil, telle qu'on la verrait isolée de la photosphère, dans la demi-sphère entière tournée vers la Terre.* Ces images ne représentent donc pas les facules et ne donnent pas l'image de la surface, particulièrement riche en détails, comme l'a soutenu Hale depuis le mois de février 1892.

En fait, l'image du calcium a un diamètre un peu plus grand que l'image du disque fournie par la photographie ordinaire sans spectroscope, et les plages brillantes de la vapeur ne sont pas identiques aux facules de la surface, mais notablement plus larges. Comme je l'écrivais en 1893, les facules sont comme un squelette sur lequel les vapeurs se fixent en le recouvrant. Ces faits ont été vérifiés depuis par plusieurs personnes.

L'étude précédente permet de préciser les liens de la chromosphère avec la surface solaire, sous-jacente, liens déjà reconnus en partie d'après les observations oculaires faites avant 1892, au bord extérieur avec les raies de l'hydrogène. *Les plages brillantes de la chromosphère correspondent aux facules ou plages brillantes de la surface, qui sont aussi les parties élevées.* Mais, comme la lumière chromosphérique est d'origine électrique ([1]), on

---

([1]) Le spectre de la chromosphère offre très intenses les raies de l'hydrogène, qui n'ont jamais été obtenues dans le laboratoire sans l'intervention électrique.

arrive à cette conclusion *dans l'atmosphère solaire, les phénomènes électriques sont plus intenses au-dessus des parties élevées de la surface* Or la même relation se présente aussi dans l'atmosphère terrestre, et l'on est conduit à rapprocher la chromosphère du phénomène de l'électricité atmosphérique terrestre

Le lien étroit avec les facules de la surface m'a incité, en 1894, à donner aux plages brillantes de la chromosphère le nom de *flammes faculaires,* qui ensuite a paru trop long J'ai proposé, en 1904, le nom de *facule*

Spectrographes enregistreurs des formes — 2° Je fixe les conditions que doivent remplir les spectrohéliographes des formes pour donner une image nette et complète des vapeurs du calcium à raies brillantes Les règles posées sont aujourd'hui suivies par tous, grâce à elles, l'appareil donne, avec la netteté maxima, non seulement les plages brillantes des facules, mais les petites plages qui constituent ce que Hale a appelé le réseau faculaire (formé par les petites facules), et ce que j'appelle le *réseau chromosphérique* Le réseau apparaît alors avec de grands détails et avec la même netteté sur toute la surface aux pôles comme à l'équateur

Les images, riches en détails, de l'année 1894, ont été reproduites déjà dans plusieurs recueils, elles ont été obtenues avec le sidérostat de Foucault, un objectif de $0^m,12$ d'ouverture et un spectrographe à un seul prisme de 60° en flint léger, avec un collimateur de $0^m,50$ et une lunette de 1^m Une condition importante, en effet, est une dispersion relativement faible Or, à la même époque, de 1892 à 1894 inclus, Hale employait avec une lunette de même longueur le spectre de quatrième ordre d'un grand réseau de Rowland, c'est-à-dire une dispersion près de cinq fois plus grande, ce qui conduit, comme on le verra nettement plus loin, à une image incomplète, ou formée par un mélange de lumières dues à des couches différentes qui, même, ne sont pas des couches basses voisines de la surface, mais des couches élevées

Spectrographes enregistreurs des vitesses ou spectrographes par sections successives — 3° Le spectrohéliographe des vitesses, d'autre part, doit avoir une forte dispersion (spectre du quatrième ordre d'un réseau Rowland et lentilles de $1^m,30$, dans le modèle organisé à Paris en 1894), au moins pour la chromosphère

intérieure au bord. Aussi exige-t-il une pose plus longue et des objectifs astronomiques plus puissants. Dans les recherches de 1894, j'ai employé un objectif de $0^{m},30$ d'ouverture, qui a été mis à ma disposition pendant quelque temps.

La seconde fente de l'appareil, large de $1^{mm},5$ environ, isolait, outre la large raie noire K du calcium, appelée K_1, les deux raies brillantes appelées K_2 et la petite raie noire centrale, nommée K_3 [1] de largeur très variable, et en plus des raies noires ordinaires voisines du spectre normal, pour la comparaison des vitesses radiales. (*Voir* la planche III qui présente ces petits spectres agrandis.) Les cases A et B reproduisent deux épreuves obtenues en février 1892 et publiées en février 1894 dans le *Bulletin Astronomique*, les autres cases contiennent des fragments d'épreuves de l'année 1894, largement agrandies. Les variations très curieuses de la largeur des raies, leurs dissymétries et leurs déplacements ont conduit à des résultats intéressants sur les mouvements de l'atmosphère solaire. [Voir *Sur les mouvements de l'atmosphère solaire* (*Comptes rendus*, t. CXIX, 1894, p. 457).]

Le même appareil est appliqué aussi à la chromosphère extérieure dont il enregistre l'épaisseur et aux protubérances, la pose nécessaire étant seulement plus longue, les déplacements des raies, qui sont faibles près du bord, sont parfois considérables dans les protubérances. D'une manière générale les déplacements et les vitesses radiales croissent avec la hauteur. De même sur la Terre, la vitesse du vent augmente avec l'altitude. [*Voir* la planche insérée en février 1894 dans le *Bulletin astronomique*, et reproduite en 1897 dans les spécimens de photographies astronomiques du

---

[1] La désignation des trois raies du calcium par l'adjonction d'un petit nombre à la lettre a été introduite récemment par Hale (en 1903). Elle est très simple et évite des répétitions. Aussi l'ai-je adoptée immédiatement dans toutes mes publications. De même les trois raies H sont désignées H_1, H_2, H_3, les nombres les plus grands correspondant aux couches de vapeur qui sont les plus élevées dans l'atmosphère.

Cependant les raies H_1 et K_1, H_2 et K_2 sont divisées en deux parties qui sont respectivement du côté rouge et du côté violet, aussi je propose d'ajouter les petites lettres *r* et *v* pour distinguer ces parties. On aurait ainsi pour K_2, K_3, et K_{2v}, les portions de raies seront aussi désignées, plus nettement encore, sinon plus simplement, par leurs longueurs d'onde.

service de spectroscopie de l'Observatoire de Paris, planche qui donne les raies brillantes H et K de protubérances ayant de grandes vitesses radiales. *Voir* aussi la planche IV des mêmes spécimens qui reproduit en vraie grandeur deux épreuves du spectrographe des vitesses de 1894, représentant l'une la chromosphère projetée sur le disque, l'autre la chromosphère extérieure au bord. Les images du Soleil sont elliptiques, à cause de la grande largeur de la seconde fente. *Voir* aussi la planche IV de ce Mémoire (cases A, B, C), qui donne des portions des épreuves précédentes, fortement agrandies. D'après ces premiers essais de 1894, pour les vapeurs extérieures au bord, la dispersion du spectrographe des vitesses pourrait être beaucoup plus faible.]

Le spectrohéliographe des vitesses est aussi utile que celui des formes; s'il donne des images au premier abord moins séduisantes, il est plus riche en renseignements utiles. Il enregistre, outre les mouvements radiaux, les pulsations en largeur des trois raies du calcium (H_1, H_2, H_3, et K_1, K_2, K_3), qui sont de facile expansion et sensibles à toutes les variations de pression et d'excitation électrique. Les variations de ces raies fournissent les indications les plus utiles sur l'état des choses dans les couches successives de l'atmosphère solaire.

Le spectrohéliographe des formes, qui a une largeur de fente constante, pour isoler une raie de largeur constamment variable, est insuffisant ou même, parfois, peut conduire à des conclusions inexactes. L'association des deux spectrographes est indispensable dans une étude complète.

Images du Soleil données par les raies noires du spectre. — Les recherches étendues qui précèdent se rapportent aux vapeurs du calcium, qui, en fait, sont privilégiées, car elles sont les seules à donner aussi nettement les trois raies énumérées ci-dessous: une raie noire très large, qui, même, est de beaucoup la plus large du spectre solaire connu, et deux raies de renversement. Les gaz hydrogène et hélium, qui s'élèvent aussi haut que le calcium dans l'atmosphère solaire, sont, à ce point de vue, différents, l'hélium surtout. Les autres vapeurs peuvent avoir des divergences encore plus grandes.

Cependant j'ai été conduit à étudier aussi les autres vapeurs

avec les appareils précédents, et par le raisonnement suivant Si la lumière de la chromosphère est d'origine électrique, et si les phénomènes électriques y sont plus intenses au-dessus des facules, toutes les vapeurs doivent avoir leur maxima d'intensité à l'emplacement des facules

D'ailleurs, lorsqu'une vapeur absorbe une radiation, qu'elle émet elle-même, elle substitue en tout ou en partie son intensité propre d'émission à l'intensité primitive de la radiation Donc l'image obtenue par l'isolement de la raie noire (qui est noire seulement par contraste) doit donner l'image même de la vapeur correspondante avec ses plages brillantes [1]

J'ai isolé d'abord avec le spectrographe des formes de petites portions des larges raies noires H_1 ou K_1, ayant remarqué que, dans les épreuves du spectrographe ordinaire ou du spectrographe des vitesses, le renforcement de la raie brillante K_2 est accompagné d'un renforcement du spectre continu dans la raie large K_1 L'image, comme on pouvait s'y attendre d'après la remarque précédente, offre aussi au-dessus des facules des plages brillantes, aussi intenses près du centre du Soleil que près des bords, mais on constate quelques différences avec les images de la raie K_2; les plages brillantes sont moins étendues, et les taches, souvent masquées dans les images K_2, se montrent nettes et non voilées, avec leur pénombre bien marquée

J'ai isolé ensuite d'autres raies noires voisines, dues au fer, à l'aluminium, au calcium, au carbone, et assez larges pour être isolées avec le spectrographe, qui était le spectrographe à faible dispersion, à un seul prisme, organisé pour les images de la raie brillante K_2 et j'ai obtenu des images semblables dans leurs lignes générales, l'extension des plages brillantes est d'ailleurs souvent variable d'une raie à l'autre, chaque image ayant ses particularités individuelles [Voir *Sur la recherche de la partie de l'atmosphère coronale projetée sur le disque* (*Comptes rendus*,

---

(1) L'image obtenue peut contenir encore une petite portion du spectre continu de la photosphère, à savoir la portion qui n'aurait pas encore été absorbée par la vapeur, elle contient aussi une portion de spectre continu, due à la couronne, et aussi peut-être à la chromosphère elle-même (qui peut aussi avoir un spectre continu superposé aux raies très brillantes des vapeurs)

t CXVII, decembre 1893, p 716) et *Images speciales du Soleil données par les rayons simples qui correspondent aux raies noires du spectre solaire* (*Comptes rendus*, t CXIX, juin 1894, p. 148)]

Reconnaissance journalière de la couche renversante et de toutes les couches superposées, projetées sur le disque — En réalité ces images nouvelles sont comprises entre les images de la photosphère et de la chromosphère, avec tous les degrés intermédiaires, ce qui s'explique aisément, puisqu'elles sont dues à la couche productrice des raies noires, appelée *couche renversante*, qui occupe la base de la chromosphère, en contact avec la surface même du Soleil

Or la couche renversante n'avait pas encore été reconnue en dehors des éclipses totales, et encore, dans les éclipses, n'est-elle visible qu'au bord sous la forme d'un croissant très mince, dénué de détails, et pendant deux secondes au commencement et à la fin de la totalité *Les expériences précédentes ouvrent donc à l'investigation journalière cette partie importante du Soleil qui est la couche renversante jusqu'alors inexplorée*

Cependant le spectrographe employé avait une dispersion trop faible pour isoler les raies noires fines, qui sont les plus nombreuses, mais la méthode s'applique aussi à toutes les raies noires qui sont, comme on sait, au nombre de 20000, à condition d'avoir un spectrographe d'une puissance suffisante Il est vrai qu'alors les poses doivent être beaucoup plus longues, et les appareils astronomiques aussi plus grands

Parmi les raies noires à isoler, j'ai recommandé en particulier les raies très noires qui, au bord solaire extérieur, sont longues et fines, et doivent donner non plus les couches basses, mais les couches élevées de l'atmosphère, et peut-être même la couronne projetée sur le disque J'ai appelé aussi l'attention sur la raie noire centrale K_3 qui correspond à une couche du calcium superposée aux couches qui donnent les raies K_2 et K_1 Bref, la méthode, appliquée avec des appareils suffisants, apparaît susceptible d'une extension considérable, elle doit pouvoir déceler toutes les couches, très diverses et superposées qui composent l'atmosphère solaire et la répartition des nombreuses vapeurs solaires dans ces couches

[*Images spéciales du Soleil données par les rayons simples qui correspondent aux raies noires du spectre solaire* (*Comptes rendus*, t. CXIX, 1894, p. 148), *Étude des gaz et vapeurs du Soleil. Comparaison entre les appareils et les méthodes employés récemment* (Journal *l'Astronomie* et *Mémoires de la Société des Spectroscopistes italiens*, décembre 1894).]

Recherches de 1895 à 1898. Deux séries d'épreuves de la chromosphère. — Les recherches de l'année 1894 ont été très fructueuses, elles ont déterminé le meilleur mode d'emploi des deux spectrographes et la nature exacte des images obtenues, de plus elles ont révélé l'extension possible de la méthode à toutes les raies noires et à toutes les vapeurs du Soleil.

Dans les années qui suivent, jusqu'à l'année 1898 incluse, les études solaires ont été moins assidues, les appareils n'ayant pas pu être modifiés de manière que leur rayon d'action fût augmenté d'une manière notable. Cette période a été coupée d'ailleurs par deux longs temps d'arrêt, qui ont correspondu à l'observation d'une éclipse totale du Soleil au Japon en 1896, et au transfert des appareils enregistreurs à Meudon en 1898.

On s'est borné à faire chaque jour, autant que possible, une épreuve avec chacun des spectrographes. Les épreuves des formes forment deux séries successives.

La première, de 1893 à 1896, a été obtenue avec un objectif de $0^m,12$ d'ouverture et $2^m,80$ de distance focale, et un spectrographe à un seul prisme de 60° en flint léger dont le collimateur et la lunette ont respectivement $0^m,50$ et 1^m. L'image finale de la chromosphère a 50^{mm} de diamètre.

La deuxième série, inaugurée en 1897, est caractérisée par une image finale plus grande, 82^{mm} de diamètre, l'objectif astronomique ayant $0^m,30$ d'ouverture et 5^m de distance focale, le collimateur et la lunette du spectrographe ayant respectivement $0^m,65$ et 1^m.

Les épreuves des vitesses ont été obtenues avec l'objectif astronomique de $0^m,30$ d'ouverture et 5^m de distance focale et un spectrographe à réseau de Rowland de 4 pouces et lentilles simples en quartz de $1^m,30$. Mais le réseau, qui était le seul existant dans le service, a été employé souvent à d'autres usages.

Toutes ces épreuves ont été classées et conservées avec soin, car elles constituent des documents utiles aux recherches présentes et futures sur le Soleil, elles ont le même intérêt que les épreuves de la surface solaire auxquelles sont consacrés des services spéciaux permanents dans plusieurs observatoires. Il y a là un premier acheminement vers l'enregistrement complet et continu des éléments variables du Soleil, enregistrement déjà réclamé dans plusieurs Notes et particulièrement précieux dans le cas de la chromosphère, qui a des variations plus grandes et plus rapides que la surface.

Photographies de protubérances et de taches exceptionnelles. — Ces séries d'épreuves conduisent à des remarques intéressantes.

1° Le 31 mai 1894, on a photographié les phases successives d'une protubérance polaire extraordinaire, qui, haute de 2′ d'arc, a atteint, 3 heures 30 minutes après, la hauteur de 10′25″, égale au tiers du diamètre solaire; or la protubérance n'est pas notée dans le relevé quotidien des spectroscopiques italiens, considéré justement comme un modèle; il y a là un argument sérieux en faveur de la continuité de l'enregistrement, ces phénomènes extraordinaires étant en général aussi très courts.

De plus, au même moment, le bord solaire offrait aussi des protubérances éruptives, diamétralement opposées à la protubérance précédente. Ces épreuves confirment la relation déjà indiquée par plusieurs observateurs du Soleil, et par Trouvelot en particulier. A chaque protubérance très importante, correspondent des protubérances également intenses, sur le côté opposé du bord; cette apparition simultanée est à mon avis très curieuse, elle fait penser à des influences analogues à celles qui produisent les marées (*Comptes rendus*, t. CXXIV, p. 171).

2° Sur quelques épreuves qui montrent des taches au bord solaire, la chromosphère présente une échancrure au point qui correspond à l'ombre. La partie basse et intense de la chromosphère manque donc au-dessus des taches. Ce résultat est confirmé par le spectre des taches étudiées au centre du disque avec le spectrographe des vitesses; la raie brillante du calcium y est seulement simple. Ce fait peut expliquer pourquoi la radiation calorifique des

taches varie peu avec leur distance au centre, car elle ne subit pas l'absorption par la partie dense de la chromosphère, qui peut être la cause des variations calorifiques pour les points ordinaires du disque (*Comptes rendus*, t. CXXVI, p. 879).

Étude spéciale du réseau chromosphérique et de ses relations avec la période solaire. — 3° Cette longue série d'épreuves est surtout utile pour l'étude des relations avec la période undécennale solaire. La chromosphère projetée sur le disque n'a pas encore été suivie pendant un temps un peu long, il est nécessaire de rechercher comment elle varie avec les taches de la surface. L'image de cette chromosphère, comme on l'a vu plus haut, offre deux parties faciles à distinguer : les plages brillantes au-dessus des grosses facules et le réseau chromosphérique. Or les plages, comme on pouvait s'y attendre, diminuent avec les facules dont elles épousent la forme générale. Mais que devient le réseau chromosphérique? On sait que, en 1893 et 1894, Hale et Evershed ont annoncé que ce réseau manquait aux pôles du Soleil sur leurs épreuves et en ont tiré un argument contre l'attribution des images à la chromosphère entière du Soleil, attribution présentée par moi comme un fait certain. J'ai annoncé d'autre part que, sur mes épreuves, le réseau était au contraire toujours présent dans l'année 1894, qui est, il est vrai, une année de maximum. Or sa présence a persisté dans les années suivantes, et même en 1897, alors que, d'après les relevés de Tacchini, les facules avaient complètement disparu aux pôles. Ce dernier fait s'ajoute aux faits nombreux qui prouvent que les images des raies brillantes sont distinctes des facules de la surface. D'ailleurs, comme on le verra plus loin, les différences entre les images des observateurs précédents peuvent s'expliquer simplement par des différences entre les dispersions des appareils employés.

Transfert et installation des deux spectrographes à l'observatoire de Meudon. — En 1898, les appareils enregistreurs ont été, en partie au moins ([1]), transférés à l'observatoire de Meudon,

---

([1]) Certaines parties de l'appareil ont en effet été laissées à Paris, parce que le crédit primitif de 5000fr avait été accordé à l'Observatoire de Paris.

lorsque j'ai été moi-même attaché à cet établissement. L'observatoire de Meudon est consacré spécialement à l'étude du Soleil, et comprend déjà un service spécial pour la photographie de la surface solaire, organisé en 1875 par M. Janssen, il était naturel de lui rattacher le service nouveau d'enregistrement de l'atmosphère du Soleil. Mais, à Meudon, les conditions ont été, peut-être, moins favorables qu'à Paris. Il n'a pas été possible, en effet, d'organiser le grand sidérostat qui eût été nécessaire, on a dû, par raison d'économie, se contenter d'un sidérostat polaire ancien à miroir plan de $0^m,30$, et d'un objectif non achromatisé pour les rayons photographiques, de $3^m,10$ de distance focale et de $0^m,20$ d'ouverture, et donc plus faible que l'objectif de $0^m,30$ employé en 1897 à Paris ([1]). De plus, avec le sidérostat polaire, qui renvoie les rayons solaires dans la direction de l'axe du monde, les appareils doivent être placés sur une table fortement inclinée, ce qui est une gêne sérieuse pour les recherches.

L'observatoire a pris à sa charge la construction du haut pilier qui porte le sidérostat, et du bâtiment annexe, et l'Académie des Sciences a accordé aux appareils enregistreurs eux-mêmes une subvention spéciale de 2500fr. Bref, dans le second semestre de 1898, les deux appareils enregistreurs, l'un à faible dispersion avec un seul prisme de flint, et l'autre à forte dispersion, avec un grand réseau Rowland de $0^m,10$, ont été de nouveau réinstallés, à peu près semblables à ce qu'ils étaient à Paris.

Le spectrographe à un prisme, qui donne la photographie de la chromosphère avec la raie K_2, a été un peu modifié, l'agrandissement par la chambre a été porté à trois, de telle sorte que l'image finale de la chromosphère atteint le diamètre de 95^{mm} (*Comptes rendus*, t. CXXIX, p. 1222).

L'enregistrement des vitesses a été organisé de façon un peu différente : les deux spectrographes sont placés côte à côte sur la même table, de manière à être entraînés facilement l'un et l'autre, soit par l'organe du mouvement continu, soit par l'organe du mouvement discontinu. Ils peuvent donc être employés l'un et

---

([1]) Le sidérostat et l'objectif de Meudon font partie du matériel qui a été réuni en 1874 pour le passage de Vénus sur le Soleil, et réparti ensuite entre tous les observatoires de France.

l'autre comme spectrographes des formes et spectrographes des vitesses

Or, comme on l'a vu plus haut, les recherches de 1894 ont montré que la chromosphère extérieure et les protubérances ont seules de grandes vitesses radiales (qui même croissent avec la distance à la surface solaire), pour cette partie de l'atmosphère, le spectrographe à un prisme suffit, il donne, avec une pose faible, 90 petits spectres juxtaposés, qui fournissent l'épaisseur de la chromosphère et les vitesses en 180 points du bord De plus, ces points sont répartis sur un cercle qui a le même diamètre que l'image fournie par l'appareil fonctionnant comme spectrographe des formes Les deux images des vitesses et des formes sont ainsi aisément comparables (*Voir* les cases D et E de la planche IV qui donnent, la première une épreuve entière de la chromosphère extérieure, en vraie grandeur, obtenue avec le spectrographe à un prisme, et l'autre une portion intéressante d'une autre epreuve semblable, agrandie plusieurs fois)

Le spectrographe à grande dispersion est nécessaire avec la chromosphère intérieure, pour avoir les vitesses radiales qui sont faibles et les détails des raies, très variables d'un point à l'autre du Soleil Les poses sont seulement plus longues, au moins doubles, et l'image finale est elliptique ou circulaire suivant la largeur adoptée pour la seconde fente (*Comptes rendus*, t CXXXV, p 500).

Troisième série d'épreuves de la chromosphère Permanence du réseau chromosphérique dans les années de minimum — La troisième série d'images de la chromosphère commence au second semestre de 1898, et a été continuée depuis sans interruption Les épreuves de 1899 et 1900 ont été suivies avec un soin particulier, car elles correspondent à des années de minimum de taches

Or, dans cette période, les larges plages brillantes ont disparu en même temps que les taches et facules, mais le réseau chromosphérique a persisté, sans changement appréciable, constitué toujours apparemment par le même nombre de mailles [1] Ce

[1] Je dis *apparemment*, car le nombre des mailles ne peut être exactement relevé étant variable avec la pose de l'epreuve En réalité le réseau est cons-

réseau, qui correspond à une couche bien déterminée de l'atmosphère, à la chromosphère proprement dite (comprise entre la couche renversante et la couronne), est donc indépendant des facules, et aussi indépendant de la période solaire, et c'est là un résultat d'une importance évidente.

D'autre part, les observations faites ne permettent pas de décider si, du maximum des taches au minimum, l'intensité de la lumière chromosphérique a varié d'une manière notable.

Structure granulaire de la chromosphère observée en 1899. — La case A de la planche V représente une belle épreuve de l'année 1899, agrandie six fois, et qui montre les détails du réseau chromosphérique ; ce dernier est constitué par des points assez nettement séparés, et dont la largeur atteint 2'' ou 3'' d'arc, le diamètre correspondant du Soleil sur la planche étant de 56^{cm}. La structure de la chromosphère apparaît granulaire, ce que j'annonçais déjà comme probable en 1897, car la surface même du Soleil, à la base de la chromosphère, d'après Langley et Janssen, a une structure semblable et les protubérances elles-mêmes qui se détachent de la chromosphère sont filiformes.

Cette épreuve est à rapprocher de la magnifique épreuve de l'année 1893 par Hale (*Astrophysical Journal,* janvier 1904, p. 41), qui montre aussi la division de la chromosphère et même plus nettement, les grains sont plus petits et mieux séparés, soit parce que l'objectif astronomique employé (1^{m},05 d'ouverture) est près de cinq fois plus grand que celui de Meudon, soit parce que l'épreuve américaine appartient à une année riche en taches.

La première explication est la plus probable, et de toute façon

---

titue par des masses brillantes isolées qui souvent se soudent et forment alors des mailles.

Souvent les mailles ont des formes polygonales qui rappellent les images formées par les bords des cratères enchevêtrés dans certaines parties de la Lune. Dans les deux cas, les mailles chromosphériques et les bords des cratères lunaires correspondent à des parties élevées de la surface de l'astre.

Lorsque la pose de l'épreuve est augmentée, des mailles plus petites et plus faibles apparaissent entre les premières mailles, et l'on a l'impression d'une surface ou d'un volume continu, qui offrent en leurs différents points des inégalités de lumière.

contient une part de la vérité, mais il est possible que l'activité plus grande de la surface et de l'atmosphère en 1903 provoque une division plus grande de la granulation

Il reste aussi à reconnaître si les grains de la chromosphère correspondent aux grains de la photosphère et aux fils des protubérances Cette dépendance, qui est probable, est difficile à vérifier · car, au moins sous nos latitudes, l'atmosphère terrestre est très rarement assez calme pour permettre aux appareils astronomiques de donner les petits détails des images solaires

Recherches de Hale et Ellerman à l'Observatoire Yerkes — A partir de 1902, les taches, qui avaient manqué pendant quelques mois, ont commencé à reapparaître et a croître sans arrêt, donnant ainsi aux études solaires un intérêt de plus en plus grand, car il semble que les lois des phénomènes soient alors plus faciles à reconnaître

Cette période nouvelle est marquée par un progrès sérieux dû à l'initiative de Hale et Ellermann, qui adaptent à ces recherches le grand réfracteur de l'Observatoire Yerkes, c'est-à-dire la plus grande lunette actuellement en service ($1^m,05$ d'ouverture et 20^m de distance focale) Le spectrohéliographe correspondant à des dimensions en rapport avec la lunette qui le porte La fente du collimateur, longue de $0^m,20$, peut recevoir le diamètre entier de l'image solaire projetée par le grand réfracteur, et large de $0^m,18$ (donc six fois plus large que l'image de Meudon) Toutes les autres pièces sont en proportion Le spectrographe, un des plus grands qui aient été construits, offre deux organes dispersifs distincts, un système de deux prismes et le même système de deux prismes, complété par un grand réseau, qui peuvent être aisément substitués l'un à l'autre et fournissent la faible et la forte dispersion notées déjà plus haut comme nécessaires. Le collimateur et la lunette ont la même longueur. Il n'y a pas d'agrandissement direct par le spectrographe, ce qui, à certains égards, est un désavantage, mais assure une grande concentration de lumière.

Les mouvements automatiques sont assurés par des moteurs électriques qui donnent un déplacement lent et continu à la grande lunette tout entière, et un mouvement proportionnel à la plaque photographique.

Certes une semblable installation est fort coûteuse, et il appartenait aux astronomes américains, qui disposent de ressources considérables, de l'organiser sur une si vaste échelle, mais elle est en même temps très difficile à organiser, et elle leur fait le plus grand honneur.

Les auteurs, avec la faible dispersion et la raie brillante K_2, ont obtenu de grandes images solaires, et en particulier la très belle image dont il a été question ci-dessus. Puis, avec le réseau, et c'est là peut-être le point le plus intéressant de leur travail, ils ont isolé des raies noires et étudié les images correspondantes, reprenant ainsi les observations, inaugurées par moi en 1894, mais dans des conditions meilleures, avec une forte dispersion et une grande concentration de lumière. La raie K_1 dont les parties successives ont été isolées a donné les particularités indiquées en 1894, et quelques points intéressants ont été précisés. De plus, les raies noires $H\beta$, $H\gamma$, $H\delta$ de l'hydrogène, isolées en leur milieu, ont donné un résultat nouveau et curieux : souvent, à l'emplacement des facules, les images de ces raies donnent non des plages brillantes par rapport au fond, mais des plages relativement noires.

Les auteurs qui hésitent sur l'interprétation à donner au phénomène sont disposés à attribuer ces plages noires aux protubérances hydrogénées qui sont projetées sur le disque. Ils ont ajouté d'ailleurs à leur Mémoire de magnifiques reproductions de toutes les images obtenues (*Publications of the Yerkes Observatory*, Vol. III, Partie I, p. 21 et *Astrophysical Journal*, janvier 1904, p. 48).

Remarques sur les résultats obtenus à l'Observatoire Yerkes. — Or, j'ai présenté les remarques suivantes sur les résultats précédents de Hale et Ellerman (*Comptes rendus*, juin 1904, t. CXXXVIII, p. 1375).

L'origine de ces images à plages relativement noires s'éclaire si l'on recourt au spectrographe ordinaire qui donne la raie entière et ses annexes. Avec une forte dispersion, les raies $H\beta$ et $H\gamma$ offrent souvent un double renversement partiel, avec une raie noire centrale, à l'emplacement des facules, ainsi que les raies H et K du calcium et le même fait a déjà été signalé par Young

en 1895 au bord solaire. Les images américaines représentent, en partie au moins, une couche supérieure de la chromosphère, celle que j'ai appelée la *troisième couche*, les deux premières étant la couche renversante et la chromosphère proprement dite.

J'ai déjà indiqué en 1894 la petite raie noire K_3, comme utile pour la reconnaissance d'une troisième couche supérieure, et même j'ai annoncé alors que les images de la raie K_3, d'après les résultats des spectrographes des vitesses, n'auraient pas les mêmes plages brillantes que celles de la raie K_2 [1], et, dans une certaine mesure, les particularités reconnues avec les raies similaires de l'hydrogène confirment cette prévision.

Cependant la raie noire centrale K_3 du calcium est beaucoup plus nette et large que la raie correspondante avec H_α et H_β de l'hydrogène et l'on peut s'étonner que les auteurs, autant qu'on peut juger d'après leur Mémoire (p. 19), n'aient pas obtenu avec elle des résultats plus nets, ou ne lui aient pas accordé une attention plus grande. Car, avec leur dispositif à forte dispersion (réseau employé dans le premier ordre sous une incidence notable et complété par deux prismes), la raie K_3, sur certains points du Soleil, est certainement plus large que la seconde fente du spectrohéliographe, employée avec sa largeur habituelle. Il est vrai que les raies brillantes intermédiaires telles que K_2 et H_2 sont, avec le calcium, relativement beaucoup plus intenses qu'avec l'hydrogène, et leur voisinage est une gêne sérieuse.

La même remarque s'applique aux premières observations de Hale en 1892 et 1893 à l'observatoire Kenwood. La dispersion (quatrième spectre d'un réseau Rowland avec lentilles de 1m) était notablement supérieure à celle de 1903. Aussi peut-on affirmer que les images obtenues par Hale à cette époque étaient formées

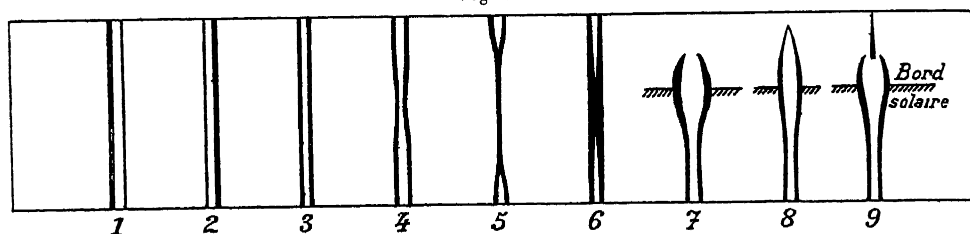
---

[1] J'ai écrit textuellement dans la Note des *Comptes rendus* de 1904, consacrée aux images avec les raies noires, tome CXIX, page 150 : « Il convient de rechercher l'image de la troisième couche, la plus voisine de la couronne, qui est donnée par la petite raie noire centrale. Cette dernière image, d'après les résultats déjà fournis par les spectrographes par sections, ne présentera pas toutes les plages brillantes des plages inférieures, elle permettra de créer entre les flammes faculaires une distinction utile à l'étude de l'atmosphère solaire autour des taches. » Les flammes faculaires sont les vapeurs brillantes du calcium au-dessus des facules.

soit par la lumière de la raie K_3, soit par un mélange de K_3 et d'une partie de K_2 variable d'un point à l'autre du Soleil.

En effet, le spectrohéliographe des formes, dans l'isolement des raies noires centrales, comporte une difficulté grave sur laquelle on doit insister. *Cette raie noire, centrale, avec le calcium en particulier, a une largeur variable, et même très variable, alors que la fente du spectrohéliographe a une largeur constante.* J'ai réuni dans le tableau schématique ci-contre les aspects divers des raies brillantes et noires, relevés sur mes épreuves de 1891 à 1894. Les raies brillantes sont représentées par des traits noirs et la raie noire par le fond blanc. Par le seul examen du dessin, on voit que le spectrohéliographe des formes doit donner souvent des résultats incomplets ou même inexacts. Avec une seconde fente très fine, une partie de la raie noire échappe; si la fente est large, la lumière de la seconde couche se mêle à celle de la troisième.

Fig. 1.



Ces remarques sont utiles pour l'interprétation exacte des images avec les raies de l'hydrogène.

A mon avis, pour l'étude des couches supérieures, le meilleur appareil est le spectrographe à grande dispersion dit *des vitesses*, ou par sections successives, mais avec des sections très rapprochées et un spectre très étroit, réduit à la raie brillante renversée. On réunirait ensuite par des courbes les points du Soleil ayant la même largeur de la raie centrale et ces courbes qui formeraient image donneraient, en quelque sorte, la carte des couches supérieures. Ces couches supérieures sont en effet des formes très accidentées, et, de même que les pays de montagnes, ne peuvent être bien représentées que par des courbes de niveau (1).

(1) J'ai déjà indiqué, en 1893, l'utilité de ces courbes de niveau solaire, dans l'enregistrement des couches supérieures avec la raie K_3. Knowledge, décembre 1893.

En tout cas, surtout pour les couches supérieures, le spectrohéliographe des vitesses est un complément obligé du spectrohéliographe des formes

Répétition des expériences de 1894 *sur les images des raies noires avec un appareil de faible dispersion* — Cependant, j'ai été conduit par le travail précédent à répéter les expériences faites en 1894, à Paris, sur l'isolement des raies noires, et avec le même appareil J'avais employé, en 1894, le spectrographe à faible dispersion organisé pour la photographie journalière avec la raie K_2, j'ai employé, en 1904, l'appareil similaire de Meudon qui a une dispersion égale (lunette de 1^m et prisme de 60° en flint léger), et diffère seulement du premier par l'agrandissement plus grand de l'image (cercle de 95^{cm} au lieu de 50^{cm})

J'ai isolé successivement, entre les différentes parties de H_1 et K_1, les raies λ406,3, 404,5, 388,7, 387,8, 389,5 du fer, λ396,05 et 394,3 de l'aluminium, la tête de bande λ388 du carbone, λ422 du calcium et λ390,5 du silicium, et en prenant la précaution d'isoler aussi deux intervalles brillants de chaque côté de la raie, pour faciliter la comparaison avec l'image de la surface même du Soleil Le résultat a été le même Les images obtenues montrent des plages brillantes à l'emplacement des facules, au centre comme au bord, moins étendues que celles des raies brillantes du calcium, mais semblables dans leurs lignes générales malgré des particularités individuelles

L'extension des plages brillantes est variable avec les raies isolées, comme je l'écrivais en 1894, et la variation est nette, surtout dans le cas de H_1 et K_1. L'éclat relatif de ces plages par rapport au fond est aussi différent suivant les raies; il est surtout grand avec la tête de bande λ3883 du carbone, les raies λ404 du fer, 396,5 de l'aluminium, mais ces différences peuvent tenir en partie à la faible dispersion qui peut ne pas écarter complètement la lumière du spectre continu voisin, introduite dans la fente trop large ou réfléchie par ses bords [*Voir* les cases A et B de la planche VI qui représentent les images du Soleil obtenues le même jour avec le spectrographe à un seul prisme, en isolant successivement la raie K_2 et la raie λ 3883 du carbone A noter aussi que ces images donnent parfois, entre les plages brillantes des facules,

un réseau brillant qui a paru relativement plus intense que le réseau chromosphérique de la raie K_2 du calcium (*Comptes rendus*, t. CXXXVIII, 1904, p. 1375 et t. CXXXIX, 1904, p. 337).]

Remarques sur l'influence de la dispersion dans les recherches avec les raies noires. — Cependant Hale, après avoir omis de signaler dans ses Mémoires de 1903 et 1904 mes résultats antérieurs de 1894 sur les raies noires autres que H_1 et K_1, leur accorde une certaine attention en avril 1905 (*Astrophysical Journal*, vol. XXI, p. 267), mais pour critiquer vivement l'emploi d'une faible dispersion. Je répondrai simplement ceci. Je n'ai pas présenté l'appareil de 1894 comme le meilleur pour le but à atteindre, je l'ai employé parce qu'il était tout monté et le seul à ma disposition. Malgré sa faible dispersion (1), il a fourni les traits principaux du phénomène, à savoir : l'apparition à l'emplacement des facules de plages brillantes de même éclat au centre et au bord, et l'extension variable de ces plages avec la radiation isolée. En fait, ces résultats généraux sont confirmés par une note ultérieure de Philip Fox (*Astrophysical Journal*, mai 1905) qui a observé avec le plus grand réfracteur et le grand spectrohéliographe de l'Observatoire Yerkes.

D'ailleurs, comme je l'écrivais en août 1904 (*Comptes rendus*, p. 1379), la faible dispersion donne l'image due à l'ensemble de la raie et de la vapeur. Or, la plupart des raies précédentes isolées offrent une raie centrale noire, et une partie dégradée plus brillante de chaque côté (2). La raie noire centrale, qui représente la

(1) Avec cette faible dispersion (2mm d'écartement environ entre les raies H et K), certaines raies noires, la raie λ 404 du fer, par exemple, sont assez larges pour que la fente puisse avoir aisément une largeur inférieure, l'appareil donne encore des résultats utiles avec les raies plus étroites, grâce à la précaution d'isoler aussi de petites portions du spectre continu voisin, ce qui élimine les petites perturbations dues à la faible dispersion, et fait ressortir l'influence particulière de la raie noire. L'opération se fait simplement, en choisissant une tache ou facule au centre du Soleil, et en faisant sur la même plaque des épreuves successives de cette petite région; lorsqu'on passe d'une épreuve à la suivante, la fente est déplacée d'une petite quantité par rapport à la raie, et les variations successives des images de la même région ainsi obtenues sont très instructives.

(2) D'après Jewell, souvent il y aurait même en plus un petit renforcement du spectre continu au delà de la partie dégradée (*Astrophysical Journal*, 1896).

partie élevée de la vapeur, peut, si elle était isolée seule, fournir une image différente Mais alors une dispersion forte est nécessaire, la même conclusion s'impose pour les raies fines du spectre solaire qui sont les plus nombreuses, et je l'ai déjà formulée en 1894, à la fin de ma Note sur la question J'ai réclamé, dix ans avant Hale, un accroissement de la dispersion

L'influence de la dispersion apparaît d'une manière saisissante dans le cas des raies H et K du calcium (*Comptes rendus*, août 1904, p 1379) Avec une dispersion qui écarte les raies H et K de 0^{mm},4, le spectrohéliographe réunit dans sa deuxième fente la raie K tout entière, avec ses composantes K_1, K_2, K_3, et donne l'image des trois couches correspondantes rassemblées, si l'écartement est de 2^{mm}, la raie K_1 peut être séparée des deux autres qui sont isolées seules, et l'on a l'image de la chromosphère entière séparée de la couche renversante, enfin, avec une dispersion encore plus grande, on obtient la chromosphère supérieure seule

L'emploi d'appareils de plus en plus puissants permet d'éliminer progressivement la lumière des couches basses et de conserver seulement la lumière des couches supérieures.

Augmentation de la lumière étrangère avec la dispersion. Spectrographe à trois fentes — Mais, lorsqu'on augmente la dispersion, lorsqu'on isole des raies de plus en plus noires, les difficultés croissent, dues à l'augmentation nécessaire de la pose, dues aussi à la lumière diffusée, ou réfléchie dans le trajet du rayon jusqu'a la plaque et en particulier dans le spectrographe lui-même J'ai examiné déjà ces inconvénients dans la Note de décembre 1893, consacrée à l'utilisation générale des raies noires, et j'ai indiqué les moyens de les éviter (*Comptes rendus*, t CXVII, p 1055).

« Le spectrographe de forte dispersion étale la lumière étrangère développée sur la première fente, mais il envoie lui-même sur la seconde fente une autre lumière étrangère formée par tous les rayons du spectre Un absorbant qui arrête une partie de ces rayons est utile, mais insuffisant Je propose un deuxième spectroscope à fentes, dont la fente collimatrice coïncide avec la seconde fente du premier L'appareil résultant qui pourra être appliqué à

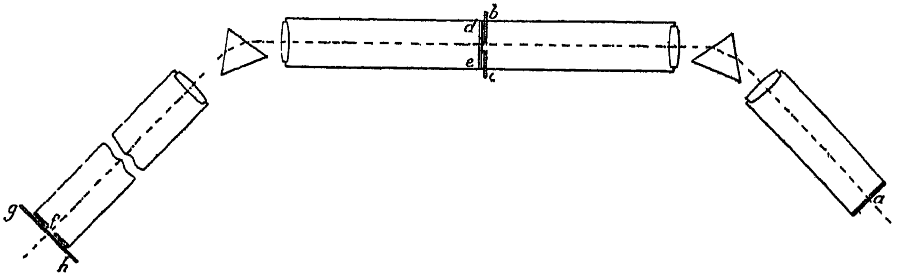
toutes les raies du spectre comprend un spectrographe en quartz à trois fentes ». Le quartz est proposé, parce qu'il est dénué de phosphorescence et de fluorescence.

Or, les réseaux en général, et le réseau que je possède en particulier, ont, dans les spectres d'ordre élevé surtout, une proportion considérable de lumière diffuse. J'ai été conduit à ajouter au spectrographe à réseau de Meudon un spectrographe a un prisme, de manière à constituer le spectrohéliographe à trois fentes, indiqué autrefois. Sa description détaillée sera donnée au Chapitre suivant.

Cette addition d'un spectrographe à prisme entraîne, il est vrai, une diminution de la lumière qui est à isoler, et donc une augmentation de la pose ou de la puissance de l'appareil astronomique.

Spectrohéliographe polychrome à trois fentes. — J'ai fait aussi en 1904 des essais sur un spectrohéliographe des formes d'un type tout nouveau, qui isole non plus une seule radiation, comme les précédents, mais plusieurs radiations dont le nombre même est variable à volonté (*Comptes rendus*, t. CXXXVIII, p. 1378). Le dessin schématique ci-contre fera bien comprendre le principe de l'appareil. Un premier spectrographe à deux fentes (dont a est la

Fig. 2.



fente collimatrice, et dont la deuxième fente est en de) est doublé d'un second spectrographe symetrique du précédent par rapport au plan de la deuxième fente de, qui leur est commune. Derrière la troisième f est une plaque photographique gh, mobile, et dont le mouvement est égal ou proportionnel à celui de l'appareil entier qui se meut dans une direction perpendiculaire à l'axe optique de

la première lunette. Les deux spectrographes sont à un seul prisme, mais ils peuvent être à plusieurs prismes ou réseaux, la seule condition à réaliser étant que leurs dispersions soient identiques. Or, un pareil système, déjà étudié par Wadworth, mais dans un autre but, a une propriété remarquable. Le faisceau lumineux émané de la première fente *a*, se réunit sur la troisième fente *f*, malgré l'étalement par les prismes, quelle que soit la largeur de la deuxième fente *de*, qui peut être simple ou multiple. De plus, le deuxième spectrographe étale la lumière étrangère diffusée par le premier, et l'ensemble a les qualités d'un spectrohéliographe à trois fentes.

Or, dans nos essais, la deuxième fente est constituée par une plaque photographique qui, étant placée en *de*, est impressionnée d'abord par le spectre solaire ou un autre spectre, et est ensuite reportee en *de*, après fixage. Les noirs de cette plaque négative arrêtent les intervalles brillants du spectre, et la lumière des raies noires passe seule. L'image finale comprend la lumière de toutes les raies noires ou de quelques-unes seulement; car il est facile de masquer sur la plaque les raies que l'on veut éliminer. L'image correspond, suivant le choix des raies, à toutes les couches réunies de l'atmosphère ou à une seule, à plusieurs vapeurs ou à une seule, à plusieurs raies d'une même vapeur ou à une seule. Ce nouveau type de spectrographe se prête aux combinaisons les plus variées, et est digne de fixer l'attention. Les premiers essais sont encourageants, mais la mise au point complète exigera une dépense sérieuse de temps et d'argent.

Ce spectrographe a été appelé *polychrome* par opposition avec tous les spectrohéliographes antérieurs qui sont monochromes.

Remarques sur les questions de priorité. — En résumé, cette longue série de recherches, depuis les débuts en 1891, a porté sur la partie de l'atmosphère solaire, jusqu'alors inexplorée, et cependant la plus importante, qui est projetée sur le disque. Limitée d'abord aux vapeurs très brillantes au-dessus des facules, elle a été étendue peu à peu à tous les points du disque, puis à toutes les vapeurs et à leurs couches diverses superposées dans le Soleil.

Les premiers résultats ont donné lieu, surtout en 1894, à une discussion très vive avec Hale, qui, ayant reconnu en même temps

les vapeurs à raies brillantes du calcium sur le disque, leur a assigné une position différente dans le Soleil, il les plaçait sous la surface même de l'astre, les confondant avec les facules de cette surface. Cette observation première du phénomène a certainement éloigné Hale des recherches avec les raies noires, dont l'étude, à un point de vue général, a peut-être la portée la plus grande. Puis, récemment, Hale est entré résolument dans la voie nouvelle, et a créé pour ces recherches une organisation complète, la plus riche de l'heure actuelle au moins par le nombre et la dimension des appareils, ce qui lui a permis d'obtenir les beaux résultats dont il a été question plus haut.

Un point, secondaire d'ailleurs, reste encore en discussion, c'est la priorité dans la découverte. Deux astronomes, Hale et Deslandres, ont abordé simultanément ces recherches, faut-il rapporter la découverte aux deux, ou à un seul?

Lorsqu'on examine les travaux des deux auteurs, on est frappé de leurs divergences. Non seulement les appareils et les méthodes diffèrent, mais aussi l'esprit général qui les anime, la façon d'aborder et de comprendre les questions et aussi de les exposer, l'un publiant des Notes très chargées de détails, l'autre condensant ses résultats en quelques phrases concises. En France les appareils sont simples, peu nombreux, à peine modifiés depuis l'origine et reliés à des appareils astronomiques de dimensions faibles ou moyennes. En Amérique on essaie les dispositions expérimentales les plus variées, avec les instruments astronomiques les plus grands.

D'ailleurs la découverte elle-même est complexe, étant formée de parties distinctes qui ont été présentées successivement d'abord sous une forme un peu flottante (comme il arrive toujours en pareil cas), puis avec la précision d'un résultat définitif.

J'ai relevé les diverses opinions émises sur ce point délicat par les principaux auteurs. Les premiers résultats sont attribués aux deux par Young, Miss Clerke, Maunder, Lockyer, par Keeler dans le discours prononcé en 1897 à l'inauguration de l'observatoire Yerkes. Par contre le nom de Hale est seul mis en avant par Cornu dans une note qui a été insérée dans l'*Annuaire du Bureau des Longitudes* en France et puis ensuite retirée, après examen, par le Bureau, comme non conforme aux faits, et ensuite aussi par Huggins et Turner.

Enfin, dans sa dernière Note d'avril 1905, Hale réclame nettement la priorité pour lui seul, et critique quelques allégations de mes précédents Mémoires. Je suis conduit à présenter ici même mon point de vue particulier dans la question, et d'une manière complète, d'autant que Hale, après avoir reproduit dans son journal mes premières Notes des *Comptes rendus* sur le sujet, a omis de publier les Notes suivantes, très nombreuses, postérieures à 1892. Les astronomes physiciens de langue anglaise, qui sont en majorité sur la planète, ont eu sous les yeux une seule face de la discussion. Cependant le journal important fondé par Hale s'intitule *An international review of Spectroscopy*.

Hale ramène les résultats principaux au spectrohéliographe des formes dont il a construit un premier modèle donnant une véritable image, en effet, c'est avec cet appareil, qu'il a reconnu en février 1892 ([1]) et photographié les vapeurs brillantes du calcium à l'emplacement des facules. De mon côté j'ai employé dans le même but le simple spectrographe ordinaire qui les décèle nettement (quoique avec une dépense de temps beaucoup plus grande), par sections successives, en donnant leurs formes, générales seulement, mais qui décèle en plus leur lien exact avec les facules de la surface, et avec la chromosphère extérieure au bord. Si l'on attribue la découverte au spectrohéliographe seul, qui donne l'image beaucoup plus détaillée des vapeurs, il faut modifier nos idées sur la découverte des protubérances faite au bord solaire extérieur en 1868. Il faut l'attribuer non à Janssen et Lockyer, qui se sont servis comme moi du spectroscope ordinaire par sections successives, mais à Huggins qui, peu après, a indiqué la méthode de la fente large, laquelle donne plus rapidement une image plus détaillée de la vapeur.

Le spectrographe ordinaire n'a pas été inférieur au spectrohéliographe des formes dans la reconnaissance précise du phénomène, bien au contraire. Il a montré seul au début que les plages brillantes de l'image avec la raie K_2, que Hale annonçait être identiques aux facules, sont en réalité notablement plus larges, et ce fait, annoncé par moi en 1893, a été vérifié en 1894 avec mon spectrohéliographe des formes, et confirmé ensuite en 1895 par

([1]) Je donnerai uniquement les dates de publications, qui seules sont à considérer.

Maunder, qui a comparé les images de la surface solaire obtenues à Greenwich aux images de la raie K_2 obtenues à Paris en avril 1894. Le même fait est nettement mis en lumière dans les publications récentes de l'observatoire Yerkes (1903-1905).

Le même spectrographe ordinaire (ou le spectrographe des vitesses) a décelé la raie brillante K^2, non plus seulement sur les facules grandes ou petites, mais sur tous les points du disque; il a montré de plus que cette raie brillante double, à l'intérieur du bord solaire, est prolongée au bord extérieur, sans solution de continuité, par une raie double identique. Ce résultat, pour lequel le spectrohéliographe des formes, réalisé à Chicago en 1892, a été impuissant, est, à mon avis, le plus notable, car il est la première révélation complète et absolument indiscutable de la chromosphère entière projetée sur le disque, jusqu'alors inaccessible.

Je n'ai pas méconnu d'autre part les avantages du spectrohéliographe, dont j'ai réclamé l'usage continu pour l'enregistrement des vapeurs dans mes premières Notes d'août 1891 et février 1892, ce que Hale omet toujours de rappeler. Même j'ai réclamé non seulement le spectrohéliographe des formes réalisé par Hale en 1892, mais le spectrohéliographe des vitesses radiales. Je n'ai considéré l'appareil des formes ni comme très nouveau, ni comme particulièrement difficile à construire. Le principe en a été donné vers 1870 par Janssen, Lockyer et Zœllner pour l'étude oculaire des protubérances, et, en 1883, Lohse a construit un spectrohéliographe pour la photographie des protubérances avec la raie rouge de l'hydrogène trop peu active, il est vrai, au point de vue photogénique. Aussi ai-je insisté sur ce fait que, avec les raies violettes du calcium, l'impression sur les plaques photographiques est intense. Les mouvements de l'appareil, déplacement continu de l'ensemble et déplacement proportionnel de la plaque, sont simples, et un bon constructeur quelconque est capable de les réaliser, d'une manière plus ou moins heureuse il est vrai, mais sans grande difficulté (¹). L'image finale, d'autre part, est formée par le mouvement d'une ligne lumineuse, ainsi que dans certains appareils déjà anciens de photographie panoramique (²).

(¹) Dans l'industrie actuelle, les ingénieurs mécaniciens ont tous les jours à résoudre des problèmes beaucoup plus complexes.

(²) Ces appareils, constitués par une chambre photographique ordinaire ayant

De plus le spectrohéliographe des formes, avec la raie brillante du calcium, est soumis à certaines règles optiques simples, que j'ai posées le premier en 1893, dix-huit mois après les premiers résultats de Hale, et qui seules assurent une image nette et complète. Ces règles ont été depuis suivies par tous et en particulier par Hale dans ses dernières recherches de 1903.

Enfin j'ai réclamé et réalisé le premier le spectrohéliographe des vitesses (pas plus difficile à construire que le précédent, d'ailleurs), et d'une importance au moins égale. *A priori*, l'enregistrement des vitesses est aussi utile que l'enregistrement des formes, et l'appareil donne en plus les détails des raies renversées, détails dont la valeur apparaît de jour en jour plus grande.

Cependant Hale, dans sa dernière Note d'avril 1905, fait quelques objections à la priorité des résultats obtenus par moi en 1902 avec le spectrographe ordinaire. « It is a well known fact, that Professor Young, many years before, observed visually reversals of the H and K lines in the vicinity of sun spots, and that Rowland and Jewell photographed those reversals before such investigations were undertaken by Deslandres and myself. » Certes Young, comme je l'ai indiqué au début de ce Mémoire, a vu une petite partie du phénomène, il a vu les raies brillantes sur les taches, et dans leur voisinage, à une distance plus ou moins grande. Mais, la facule qui entoure une tache est beaucoup plus grande que la tache et, surtout, la plupart des facules sont sans tache. De plus Young n'a pas reconnu la position exacte des vapeurs par rapport à la surface.

J'ai signalé, le premier, en février 1892, la duplicité du renver-

---

dans leur plan focal une fente fixe, tournaient d'une manière continue autour du centre optique de l'objectif. la plaque photographique, courbée suivant un cercle, était immobile. Ces appareils ont donné de bons résultats dès l'année 1857 avec le collodion humide. Les nouveaux objectifs à grande ouverture et à grand champ les ont fait abandonner. Avec ces appareils, la pose T, qui est proportionnelle à la longueur l de l'image, est aisée à calculer si l'on connaît le temps de pose t d'une image ordinaire sans fente. $T = \frac{l}{a} \times t$, a étant la largeur de la fente. La même formule simple s'applique au spectrohéliographe, avec la raie K_2 et un spectrographe peu lumineux, t peut être considéré comme égal à une demi-seconde. Pour un soleil de 50^{mm}, $T = 250$ secondes si la seconde fente est égale à $0^{mm},1$.

sement dans les raies H et K, et evidemment Rowland et Jewell avaient déjà sur leurs photographies ce renversement double, quoique peu net et intense à cause de l'emploi du réseau concave, qui donne seulement le résultat moyen sur une petite section faite dans le Soleil, mais Jewell a publié seulement en 1896, c'est-à-dire quatre ans après, les résultats, fort intéressants d'ailleurs, des nombreuses épreuves de Rowland sur ces raies de calcium et d'autres raies du spectre

Toute la discussion qui précède se rapporte aux raies brillantes H et K du calcium qui, il est vrai, sont exceptionnelles Or le calcium a d'autres raies qui sont noires, et le Soleil a beaucoup d'autres vapeurs et d'autres raies, également noires J'ai montré le premier, en 1893 et 1894, que ces raies et ces vapeurs se prêtaient à des recherches analogues, et que même la méthode pourrait déceler les diverses couches superposées de ces vapeurs, et peut-être aussi l'image de la couronne Les recherches de Hale dans cette voie nouvelle datent seulement de 1903, elles ont été poursuivies d'ailleurs avec des appareils beaucoup plus puissants que les miens, et donc susceptibles de donner des résultats nouveaux

Dans ses derniers Mémoires, Hale insiste beaucoup sur la propriété qu'a le spectrohéliographe des formes de déceler des détails qui, avec le spectrographe ordinaire, étant concentrés sur une ligne trop mince ou mal isolée, ne sont pas visibles. L'intégration de ces lignes minces par l'appareil fait apparaître les détails Je suis d'accord avec Hale sur ce point, et je remarque seulement que j'ai employé le premier le spectrohéliographe dans les cas où il possède la vertu précédente, c'est-à-dire avec les raies brillantes ou noires et une faible dispersion de l'appareil.

Telles sont les remarques générales que j'ai dû faire pour répondre aux objections américaines et faire ressortir ma part personnelle dans les nouveaux résultats

En tout cas, ces discussions et l'exposé complet des recherches antérieures mettent nettement en lumière la valeur des nouvelles méthodes et font prévoir leur extension de plus en plus grande dans les recherches futures

DESCRIPTION DÉTAILLÉE DES APPAREILS

Les recherches poursuivies à Paris de 1891 à 1897 ont été continuées à Meudon dans des conditions qui, considérées dans leur ensemble, sont à peu près semblables. Il suffira d'exposer en détail l'organisation adoptée à Meudon, après avoir rappelé l'organisation première de Paris, déjà décrite dans plusieurs Notes précédentes

Division des appareils en deux groupes distincts — L'étude du Soleil exige en général deux groupes d'appareils qui sont réunis, mais distincts Les premiers sont les appareils astronomiques proprement dits qui fournissent une image réelle du Soleil, les seconds, qui sont plutôt des appareils de physique, utilisent cette image pour reconnaître les différentes parties du Soleil et de son atmosphère, leurs formes, leurs mouvements et surtout leur rayonnement si complexe Ils sont sous la dépendance des premiers, au moins pour les dimensions et certaines de leurs propriétés Dans l'étude de l'atmosphère solaire, les seconds appareils sont le plus souvent des spectroscopes ou des spectrographes dont la nature et la puissance sont très variables suivant les cas, qui peuvent être de simples spectroscopes en bois a un prisme, ou des spectrographes puissants à réseau, munis de nombreux organes accessoires et animés de mouvements automatiques. Ils doivent seulement utiliser le mieux possible la lumière de l appareil astronomique, avoir une clarté au moins égale, et être en rapport avec l'image réelle du Soleil Leurs dimensions augmentent avec celles de l'appareil astronomique, et la dépense croît simultanément pour les deux groupes d appareils

Appareils astronomiques de Paris — A Paris, de 1891 a 1897, j'ai employé les appareils astronomiques disponibles ou en dépôt dans la collection, à savoir le sidérostat de Foucault à miroir plan de $0^m,30$, établi par M Wolf dans la partie est du jardin avec un petit bâtiment annexe réservé à l'observation; et, avec le

sidérostat, un miroir concave argenté ($0^{m},20$ d'ouverture et $2^{m},50$ de distance focale) et un petit objectif photographique ($0^{m},13$ d'ouverture et $2^{m},80$ de distance focale). Par intervalles, j'ai eu à ma disposition un objectif plus grand, mais non achromatisé pour les rayons chimiques ($0^{m},30$ d'ouverture et 5^{m} de distance focale). La salle attenante au sidérostat, large de 3^{m}, et longue seulement de 4^{m} en 1891, a été prolongée en 1893 jusqu'à la longueur de 7^{m}.

Or le sidérostat de Foucault s'est montré très propre à ce genre de recherches ([1]), il renvoie les rayons solaires dans une direction horizontale constante (direction sud) et permet d'étudier le Soleil aussi facilement qu'une source de laboratoire. J'ai pu appliquer au Soleil les appareils les plus divers, et employer de simples spectroscopes en bois, modifiés rapidement suivant les besoins de la recherche. Avec un équatorial ordinaire, la commodité eût été moindre, la dépense de temps et d'argent plus grande.

Par contre, le miroir plan introduit une déformation de l'image, une perte et une diffusion notables de la lumière solaire, de plus, dans ce type Foucault, l'image solaire tourne autour de son centre avec une vitesse variable, et le centre lui-même, à cause de la complexité du mécanisme, n'a pas la fixité annoncée par la théorie. Ce dernier inconvénient, qui est notable avec le sidérostat de Paris, déjà ancien, et le premier de ce type construit avec de grandes dimensions, serait très atténué ou même supprimé dans les modèles plus récents.

Les deux appareils enregistreurs organisés en 1893, dans le petit bâtiment annexe, ont trouvé aussi de grandes facilités par l'intermédiaire du sidérostat. Le spectrographe enregistreur à faible dispersion, et surtout le spectrographe enregistreur à grande dispersion ont un poids et des dimensions dont un équatorial ordinaire s'accommode difficilement, leurs mouvements automatiques sont réalisés avec une sûreté et une simplicité plus grandes dans

(1) Ayant été chargé, en 1890, d'organiser à l'Observatoire de Paris un service de spectroscopie astronomique, j'ai eu à ma disposition les appareils astronomiques à ce moment non utilisés, à savoir le grand réflecteur de $1^{m},20$ et le sidérostat de Foucault, et ce sont les avantages évidents du sidérostat pour l'étude spectrale du Soleil qui m'ont engagé à l'entreprendre.

un plan horizontal et sur la base solide du sol naturel Enfin l'enregistrement absolument continu des vapeurs solaires, réclamé depuis 1893, serait aussi plus aisé avec le sidérostat

Etat des choses à Meudon en 1898 — C'est pourquoi, lors du transfert à Meudon en 1898, j'ai réclame au début la construction dans le nouvel observatoire d'un sidérostat du même type, du type Foucault, mais de dimensions plus grandes Le miroir plan devait avoir au moins $0^m,60$ de diamètre, de manière à fournir la lumière à l'un des grands objectifs de la grande lunette de l'Observatoire, par exemple à la lunette photographique, de $0^m,62$ d'ouverture et 16^m de distance focale La partie mécanique aurait reçu les perfectionnements qui ont été réalisés dans le grand sidérostat de l'Exposition de 1900, et qui assurent au miroir plan un mouvement plus régulier

L'observatoire de Meudon n'avait, en 1898, aucun bâtiment, aucun appareil astronomique, aucun spectroscope, spécialement disposés pour l'étude de l'atmosphère solaire Mon prédécesseur, M Trouvelot, avait poursuivi, de 1885 à 1895, le relevé quotidien de la chromosphère et des protubérances au bord solaire extérieur par l'observation oculaire, mais l'objectif astronomique de $0^m,20$ et le spectroscope à réseau qu'il employait (portés par une monture équatoriale ordinaire) étaient sa propriéte personnelle et avaient été retirés après sa mort D'autre part, les bâtiments de l'observatoire, qui sont anciens et n'ont pas été construits pour les observations astronomiques, sont orientés vers le soleil levant, et, en fait, aucun des laboratoires existants, aucune des chambres disponibles, n'avait de fenêtre tournée vers le Sud et capable de transmettre la lumière solaire à un appareil fixe pendant la journée entière.

Conditions spéciales faites à l'organisation nouvelle de Meudon. Discussion des solutions possibles. — Tout était donc à créer. En premier lieu, un bâtiment spécial aux recherches nouvelles a paru indispensable, et c'est à lui qu'on a consacré la somme de 10000^{fr} qui a pu être obtenue du Ministère Avec un si faible crédit, le bâtiment (représenté dans la case A de la planche I) est nécessairement petit, la surface intérieure couverte est seulement

de 5^m sur 8^m. Pour les appareils astronomiques, on a dû se contenter du matériel disponible dans la collection de l'observatoire, à savoir : d'un sidérostat du type polaire, à miroir plan de $0^m,30$, et d'un objectif astronomique non achromatisé pour les rayons actiniques, de $0^m,20$ d'ouverture et de $3^m,10$ de distance focale, qui proviennent de l'expédition du passage de Vénus sur le Soleil en 1874. Le bâtiment a été disposé de manière à recevoir, d'une part, la lumière des appareils astronomiques et, d'autre part, à contenir les appareils enregistreurs. Pour ces derniers, une subvention spéciale de 2500^fr a été accordée par l'Académie des Sciences.

C'est avec ces faibles moyens qu'on a dû organiser à Meudon les nouvelles recherches. Les conditions sont les mêmes qu'à Paris, ou même inférieures, à cause de l'ouverture plus faible des appareils astronomiques, aussi les progrès réalisés ne peuvent être très notables. La solution précédente, adoptée sous la pression des circonstances, a été considérée d'ailleurs comme seulement provisoire, mais, malgré tous les efforts et toutes les démarches, elle n'a pu encore, après sept années, être modifiée ou améliorée.

Les ressources ont manqué jusqu'à présent pour réaliser les perfectionnements et agrandissements projetés.

Une autre solution a été aussi examinée dès le début, c'est la solution, avantageuse à certains égards, qui a été adoptée par Hale à l'observatoire Kenwood de Chicago en 1891 et ensuite à l'observatoire Yerkes en 1903, et qui consiste à fixer les appareils de recherches et aussi les appareils enregistreurs à un équatorial ordinaire. L'observatoire de Meudon avait, en 1898, deux équatoriaux disponibles, un petit équatorial dit de huit pouces, avec une lunette de $0^m,20$ d'ouverture et $3^m,10$ de distance focale, dont la monture a été utilisée par Trouvelot dans ses observations de protubérances, et le grand équatorial qui porte deux grandes lunettes accolées, ayant chacune 16^m de distance focale, et des ouvertures respectivement égales à $0^m,62$ et $0^m,84$.

Mais les montures des deux équatoriaux sont trop légères pour porter des poids un peu lourds, et cette solution a dû être écartée. L'équatorial de huit pouces a été construit pour les expéditions lointaines, et la monture a été réduite le plus possible, il convient seulement pour les observations oculaires avec des appareils de

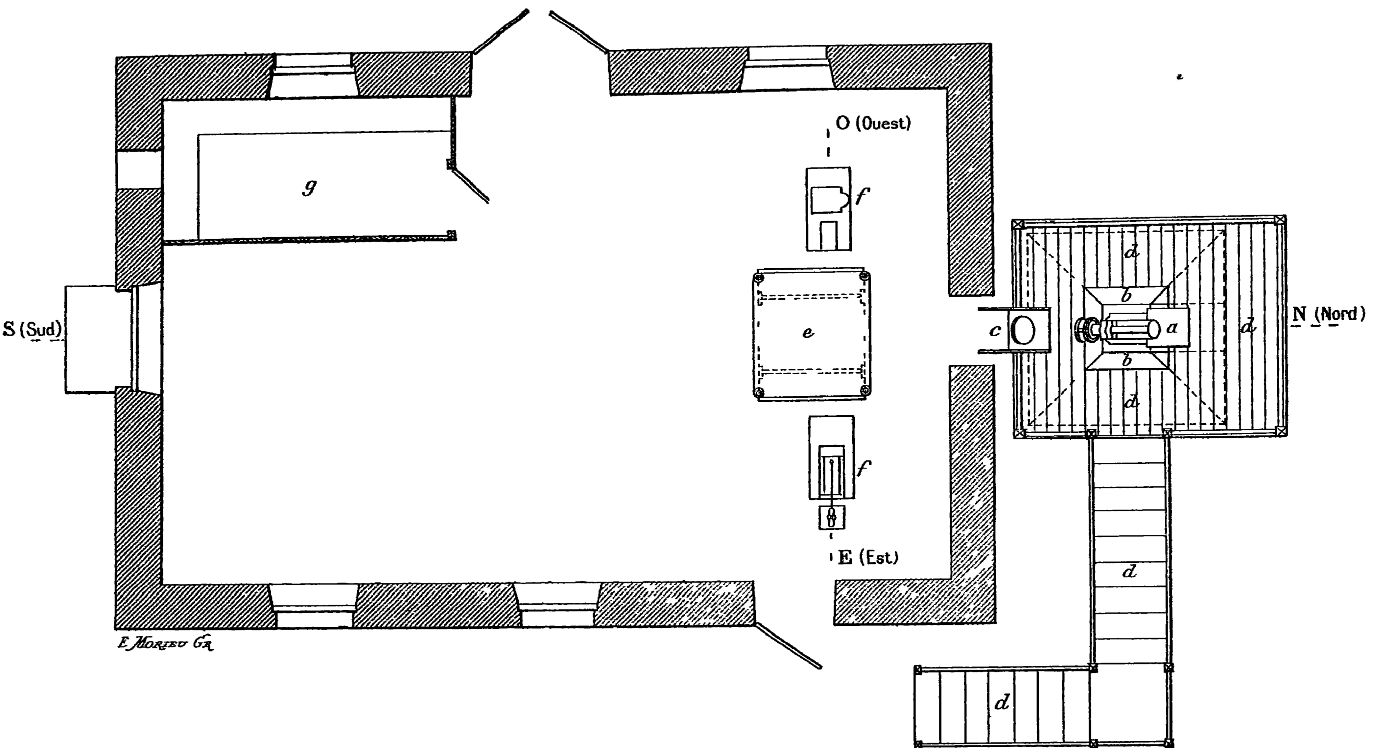
faible poids, comme les spectroscopes destinés aux protubérances, c'est à ce dernier usage que mon prédécesseur Trouvelot l'a employé de 1885 à 1895, et cette destination lui a été conservée, même le spectroscope à réseau de Rutherfurd, que Trouvelot avait organisé, a pu être racheté à ses héritiers et fixé de nouveau à l'équatorial.

Le grand équatorial, d'autre part, donne lieu à des remarques similaires, la monture, après avoir été construite pour recevoir une seule lunette, a dû en recevoir deux, et elle est portée par un pilier extrêmement elevé, aussi l'instrument est peu stable et entre facilement en vibration. La longueur focale des lunettes, d'autre part, est plus grande que celle qui avait été prévue, et l'espace est restreint entre l'arrière des lunettes et la coupole ou les garde-fous des plates-formes, et surtout entre cet arrière et les grosses pièces métalliques inclinées qui guident la plate-forme mobile où l'observateur se tient le plus souvent. Il y a de très grands inconvénients à fixer aux lunettes des appareils qui soient lourds ou un peu longs, à moins de modifier profondément tout le mécanisme. On a projeté cependant pour le grand équatorial un spectrohéliographe automatique, de faibles dimensions, et construit avec des matériaux légers, qui utiliserait une petite portion de la grande image solaire, large de 16^{cm} qui est fournie par la grande lunette. Ce spectrographe, qui serait coûteux et difficile à construire, mais utile pour certaines recherches spéciales, n'a pu encore être réalisé, de même que plusieurs autres appareils projetés.

Description des appareils astronomiques de Meudon. Sidérostat polaire. Objectif astronomique. — La disposition générale adoptée est résumée dans les dessins ci-joints, qui représentent le premier un plan général des parties, le second une coupe générale dans le plan méridien et le troisième une coupe dans le plan perpendiculaire (*fig.* 3, 4 et 5).

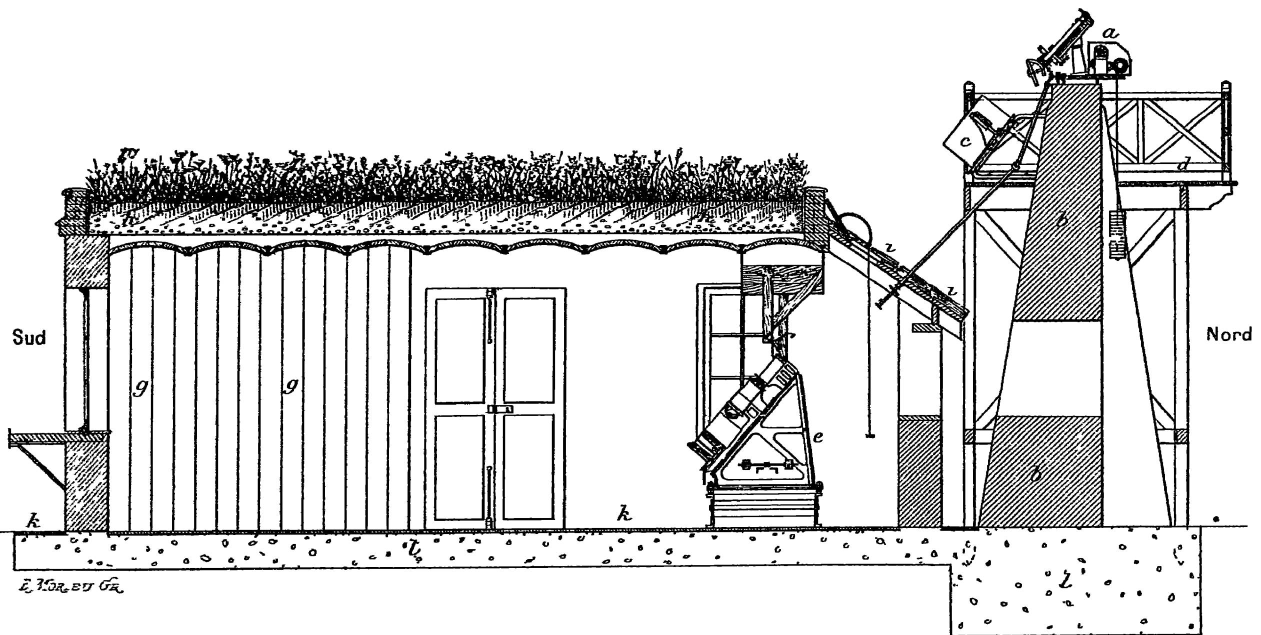
La disposition des parties est commandée par la nature du sidérostat polaire, qui a son miroir plan à la partie inférieure de l'axe polaire, et qui réfléchit les rayons solaires vers le Sud et vers le bas, dans une direction parallèle à l'axe du monde, inclinée à Meudon de 48°50′ sur le plan horizontal. Sur le trajet des rayons réfléchis on place l'objectif astronomique et plus bas les appareils

Fig 3 — Plan du pilier qui porte les appareils astronomiques et du bâtiment annexe qui contient les spectrographes



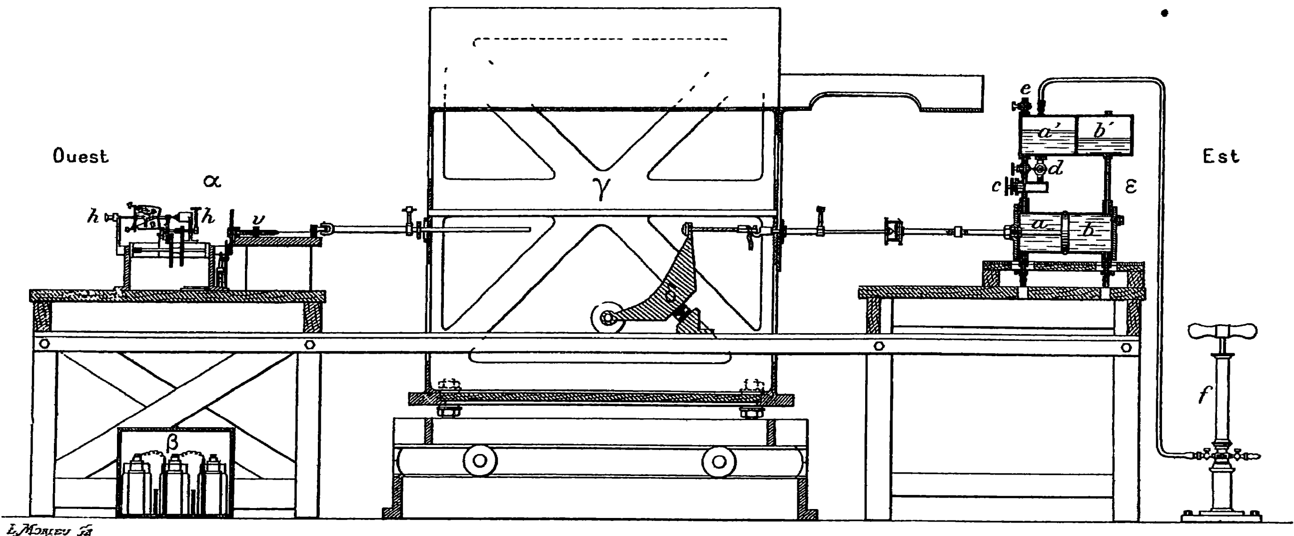
a, siderostat,
b, pilier,
c, objectif astronomique
dd, galerie et escalier,
e, grande table mobile qui porte les spectrographes,
ff, tables fixes,
g, cabinet photographique

Fig 4 — Coupe suivant S.-N. (Sud-Nord) à la même échelle que dans la figure 3



hh, toit en fer et briques recouvert de terre et d'herbe,
u, toit en appentis recouvert de chaume traversé par un trou circulaire,
k, asphalte,
l, béton sur sol naturel

Fig. 5. — Coupe suivant O-E (Ouest-Est) faite à une échelle plus grande que dans les figures 3 et 4



α organe du mouvement discontinu,
β, piles électriques,
γ, grande table mobile porte-spectrographes,
δ, poids moteurs du mouvement continu,
ε, organe du mouvement continu

rostat. Le sidérostat lui-même est recouvert par une cabane, munie de plusieurs portes et supportée par la galerie, sans avoir aussi aucun contact avec l'appareil astronomique, l'action du vent sur ce dernier est aussi réduite que possible.

Par contre, l'objectif astronomique, pour des raisons faciles à saisir, est porté par le pilier lui-même et de manière qu'on puisse lui faire tous les réglages nécessaires. Il a son centre dans le prolongement de l'axe polaire du sidérostat et est fixé à une coulisse qui se meut parallèlement a cet axe. Mais une condition essentielle a réaliser est que l'axe optique de l'objectif coïncide avec l'axe polaire du siderostat, ce résultat est obtenu par la liaison spéciale de l'objectif avec sa coulisse, liaison telle que l'objectif peut tourner autour de son centre, et donc prendre une orientation quelconque dans l'espace (*voir* les cases A et B de la planche I et la figure 4).

Dans ces conditions, il est facile de mettre au point, sur la fente des spectrographes, l'image réelle du Soleil avec la netteté maxima.

Bâtiment annexe. — Le bâtiment annexe lui-même offre des particularités dignes d'être signalées. Il doit offrir dans la partie Sud un trou, large au moins de $0^m,30$, pour le passage du faisceau solaire réfléchi par le sidérostat, et pour éviter que ce trou corresponde à un angle vif du bâtiment, on a donné à la partie sud du toit la forme dite *en appentis*. Le toit lui-même doit remplir certaines conditions. Il doit être peu élevé et échauffer peu l'air ambiant pour gêner le moins possible le faisceau solaire qui, dans le milieu du jour, passe au-dessus de lui avant d'arriver au miroir du sidérostat. Il doit aussi être peu conducteur de la chaleur pour favoriser le maintien d'une température à peu près constante à l'intérieur du bâtiment annexe. Les spectrographes, et les spectrographes à deux fentes en particulier, sont dérangés par les variations de température. On a été conduit ainsi à faire un toit en fer et briques, recouvert par des substances imperméables à l'eau, et une couche de terre qui est épaisse au moins de $0^m,30$ et gazonnée. Le toit en appentis, d'autre part, est recouvert par du chaume qui est aussi mauvais conducteur.

Le sol du bâtiment a été bétonné, puis recouvert d'une couche

Le sidérostat est établi sur un fort pilier dont la hauteur est calculée de manière que l'image solaire fournie par l'objectif astronomique de $3^{m},10$ soit à $1^{m},90$ environ au-dessus du plancher du bâtiment annexe, plancher qui est à peine plus élevé que le sol naturel. Le pilier lui-même, en maçonnerie et ciment, a la forme d'un tronc de pyramide, large à la base de 2^{m}, au sommet de $0^{m},50$ et haut de $4^{m},60$. Il assure une base solide au sidérostat polaire. Au nord il présente une face verticale, le long de laquelle se déplace le poids moteur du mouvement d'horlogerie, et en son centre il offre une large ouverture qui correspond à la fenêtre nord du bâtiment annexe et qui est préparée pour le cas d'une seconde réflexion imposée aux rayons solaires. Un miroir plan, placé dans le bâtiment annexe, à la même hauteur, peut en effet renvoyer les rayons solaires réfléchis une première fois suivant l'axe du monde, dans la direction nord du plan horizontal à travers la fenêtre nord du bâtiment et l'ouverture centrale du pilier, sans gêner les appareils à l'intérieur du bâtiment et dans les conditions les plus favorables au point de vue optique, puisque l'angle d'incidence, dans cette seconde réflexion, est un minimum (*fig.* 4).

Le sidérostat lui-même est assez médiocre, ayant été construit pour l'observation du passage de Vénus au Japon en 1874, c'est-à-dire pour une observation qui n'exige pas une marche très régulière de l'appareil et des mouvements de rappel très doux et très précis. Il a pu suffire, dans la plupart des cas, grâce à la simplicité inhérente à ce genre d'appareils et à quelques petites modifications de détail. Mais les mouvements de rappel sont d'un type ancien, surtout ceux en déclinaison, et ne permettent pas d'une manière sûre les déplacements très petits de l'image solaire. Leur insuffisance apparaît dans les observations qui exigent une pose longue, par exemple dans la photographie des protubérances et des images monochromatiques du Soleil avec les raies noires du spectre.

L'accès au sidérostat est assuré par une galerie en bois qui entoure le sommet du pilier et est reliée à la porte d'entrée du bâtiment annexe par un escalier spécial.

La galerie et l'escalier n'ont aucun point de contact avec le pilier pour que leurs vibrations ne se communiquent pas au sidé-

rostat Le sidérostat lui-même est recouvert par une cabane, munie de plusieurs portes et supportée par la galerie, sans avoir aussi aucun contact avec l'appareil astronomique, l'action du vent sur ce dernier est aussi réduite que possible

Par contre, l'objectif astronomique, pour des raisons faciles à saisir, est porté par le pilier lui-même et de manière qu'on puisse lui faire tous les réglages nécessaires Il a son centre dans le prolongement de l'axe polaire du sidérostat et est fixe à une coulisse qui se meut parallèlement à cet axe Mais une condition essentielle à réaliser est que l'axe optique de l'objectif coincide avec l'axe polaire du sidérostat, ce résultat est obtenu par la liaison spéciale de l'objectif avec sa coulisse, liaison telle que l'objectif peut tourner autour de son centre, et donc prendre une orientation quelconque dans l'espace (*voir* les cases A et B de la planche I et la figure 4)

Dans ces conditions, il est facile de mettre au point, sur la fente des spectrographes, l'image réelle du Soleil avec la netteté maxima

Bâtiment annexe — Le bâtiment annexe lui-même offre des particularités dignes d'être signalées Il doit offrir dans la partie Sud un trou, large au moins de $0^m,30$, pour le passage du faisceau solaire refléchi par le sidérostat, et pour éviter que ce trou corresponde à un angle vif du bâtiment, on a donné à la partie sud du toit la forme dite *en appentis* Le toit lui-même doit remplir certaines conditions Il doit être peu élevé et échauffer peu l'air ambiant pour gêner le moins possible le faisceau solaire qui, dans le milieu du jour, passe au-dessus de lui avant d'arriver au miroir du sidérostat Il doit aussi être peu conducteur de la chaleur pour favoriser le maintien d'une température à peu près constante à l'intérieur du bâtiment annexe Les spectrographes, et les spectrographes à deux fentes en particulier, sont dérangés par les variations de température On a été conduit ainsi à faire un toit en fer et briques, recouvert par des substances imperméables à l'eau, et une couche de terre qui est épaisse au moins de $0^m,30$ et gazonnée. Le toit en appentis, d'autre part, est recouvert par du chaume qui est aussi mauvais conducteur.

Le sol du bâtiment a été bétonné, puis recouvert d'une couche

d'asphalte qui se prolonge à l'extérieur du bâtiment jusqu'à 1^m, de manière à arrêter l'humidité du sol.

Le bâtiment offre au Nord une petite fenêtre dont il a été question plus haut, sur les côtés Est et Ouest, une porte et deux fenêtres, et sur le côté Sud, une large fenêtre munie à l'extérieur d'une large pierre destinée a recevoir un héliostat ou d'autres appareils similaires. A l'intérieur de la pièce, on a ménagé un petit cabinet fermé qui doit servir de laboratoire photographique. Enfin le bâtiment, au Sud, à l'Est et à l'Ouest, a été entouré d'arbres peu élevés qui ont paru utiles pour éviter l'échauffement des murs qui, d'ailleurs, sont épais au moins de $0^m,50$ (*voir* Pl. I, case A et aussi les figures 3 et 4).

Grande table mobile qui porte les appareils. — Comme on l'a vu plus haut, les rayons solaires arrivent inclinés de 49° sur l'horizon et forment une image réelle du Soleil à l'intérieur du bâtiment et à $1^m,9$ au-dessus du sol.

Les appareils doivent être placés sur leur prolongement, c'est-à-dire dans l'espace restreint (long de $2^m,50$) compris entre l'image et le sol. Avec le sidérostat de Paris qui renvoie les rayons dans une direction horizontale, les conditions étaient beaucoup plus favorables : on pouvait avoir, dans la direction du rayon, plusieurs tables échelonnées qui portaient les appareils les plus divers, à savoir les appareils permanents employés tous les jours, et les appareils passagers ou de recherches proprement dites et constamment variables. Il suffisait de déplacer horizontalement l'objectif astronomique et d'organiser pour lui des stations successives correspondant aux diverses tables. C'est ainsi que, à Paris, les appareils enregistreurs, spectrohéliographe des formes et spectrohéliographe des vitesses, étaient portés par la première table seule ou les deux premières tables qui étaient mobiles sur rails perpendiculairement au plan méridien, il était facile de les déplacer et d'écarter ainsi tout obstacle au passage des rayons solaires envoyés vers la troisième table qui, le plus souvent, était fixe.

A Meudon, avec le sidérostat polaire, il a fallu disposer tous les appareils sur la même table, et c'est là un grand inconvénient du dispositif, au moins pour les recherches proprement dites. Si les appareils sont permanents, la gêne est très réduite, et même, à

d'autres égards, le sidérostat polaire apparaît supérieur, car avec lui, pendant toute la journée, et même pendant plusieurs jours, le miroir plan se présente de la même façon aux rayons solaires, sous le même angle d'incidence, et les images solaires obtenues dans des conditions semblables sont plus comparables. Cet avantage et la grande simplicité du mécanisme, qui assure une marche régulière, rendent le sidérostat polaire très apte à l'enregistrement continu des vapeurs.

La table, qui est forcément unique, est large et, comme elle doit recevoir les appareils enregistreurs, elle est mobile perpendiculairement au méridien. Elle est métallique et formée de quatre parties distinctes : 1° la table proprement dite, qui est un rectangle en fonte, dont le côté parallèle à l'axe du monde a 1m,70, et le côté perpendiculaire, 1m,10 ; elle fait corps avec deux autres rectangles métalliques, l'un presque vertical, et l'autre horizontal, de manière à constituer un grand parallélépipède à section triangulaire et à arêtes horizontales ; 2° un grand cadre rectangulaire en fonte, horizontal, qui porte la pièce précédente, par l'intermédiaire de quatre grosses vis, qui permettent de donner à cette dernière la hauteur et l'inclinaison exactement nécessaires. Ce grand cadre présente à sa partie inférieure deux rails bien horizontaux, perpendiculaires au méridien ; 3° quatre galets, montés sur deux essieux, qui supportent les rails précédents, et roulent sur deux rails fixes également horizontaux et perpendiculaires au méridien ; 4° un cadre métallique, fixé au sol, qui comprend les deux rails fixes précédents.

Dans ces conditions, la table se déplace en faisant rouler avec ses deux rails, mobiles avec elle, les galets qui roulent en même temps sur les rails fixes inférieurs, son déplacement étant exactement le double de celui des galets. Les frottements sont seulement des frottements de roulement, et sont très réduits, comme avec les billes d'acier, avec cet avantage en plus que les poids entraînés peuvent être plus grands. La table, qui avec les accessoires pèse plus de 500kg, se meut avec une extrême douceur, et sous le moindre effort.

Deux des galets, d'ailleurs, sont à gorge, et les rails correspondants ont sur la surface de roulement une épaisseur exactement égale à la largeur de la gorge, ce qui rend impossible le déplace-

ment du chariot dans le sens perpendiculaire aux rails, ou dans le plan du méridien.

La même disposition avait été adoptée à Paris, mais la table était moins large et le poids entraîné beaucoup moindre. A Paris, les deux essieux étaient réunis par un cadre métallique fixé à leurs extrémités par des vis à pointes, et donc entraîné avec eux ; ce cadre, qui maintient l'écartement et la direction des roues, est utile, mais, dans l'appareil de Meudon, après avoir été employé au début, il a été supprimé, à cause des difficultés de réglage et de son poids déjà notable ; il n'est pas indispensable.

La table proprement dite, comme on l'a vu plus haut, est large, dans le plan méridien, de 1^{m},70 et, dans le sens perpendiculaire, de 1^{m},10. Mais on peut ajouter sur chaque côté des consoles métalliques, dont la longueur a été portée à 0^{m},70, de telle sorte que, dans le sens Est-Ouest, la largeur est augmentée à volonté jusqu'à 2^{m},50.

Disposition générale des appareils enregistreurs. — Cette table unique a dû recevoir à la fois les deux appareils enregistreurs et les autres appareils employés éventuellement pour les recherches. Comme les appareils enregistreurs, à eux seuls, occupent toute la place disponible, on les a construits de manière à pouvoir les monter ou démonter rapidement, ce qui permet ou de les adapter à des études nouvelles ou de les remplacer aisément par d'autres.

Les appareils enregistreurs sont organisés d'après les principes posés en 1891 et 1892, précisés en 1893, et appliqués d'abord à Paris ; comme on l'a écrit plus haut, les appareils de Meudon, quelques points de détails mis à part, sont semblables à ceux de Paris.

Je crois devoir rappeler les termes mêmes de la note des *Comptes rendus* de 1893 (t. CXVII, p. 716) qui précise la nature et les propriétés des deux spectrographes (1).

Après avoir réclamé l'enregistrement continu de tous les éléments variables du Soleil, et en particulier de la photosphère et de la chromosphère, après avoir réclamé pour la matière solaire

(1) *Voir* aussi le numéro de *Knowledge*, décembre 1903.

l'enregistrement non seulement des formes, mais des vitesses radiales, j'ajoute

« Pour la photographie de la chromosphère (avec le spectrohéliographe des formes à mouvement continu et avec la raie K_2), Hale emploie la plus forte dispersion de son grand spectrographe à réseau, soit le spectre de quatrième ordre Or la théorie et l'expérience me conduisent à une conclusion contraire *une faible dispersion est bien préférable* Théoriquement, la netteté la plus grande et l'intensité réelle des flammes seront obtenues lorsque la fente devant la plaque sera aussi large que la fente du collimateur ([1]), et contiendra toute la raie de la flamme et nulle autre lumière Ces conditions sont impossibles à réaliser exactement, mais on s'en rapproche d'autant plus que les fentes sont plus fines et la dispersion plus faible Car la raie s'élargit avec la dispersion »

J'ajoute qu'une dispersion fournie par un seul prisme et assurant aux raies H et K un écartement de 2^{mm} a paru convenable pour le but à atteindre Puis je continue :

« Pour la photographie des mouvements radiaux, il convient au contraire d'employer une forte dispersion, une seconde fente très large et un mouvement discontinu, formé d'arrêts et de déplacements égaux »

« J'emploie donc deux spectrographes, l'un de faible, l'autre de forte dispersion Pour simplifier, je les dispose de manière qu'ils reçoivent simultanément la lumière d'une même image du Soleil fournie par un sidérostat et un seul objectif Ils se déplacent ensemble à la même vitesse moyenne, le premier ayant un mouvement uniforme, le second un mouvement régulièrement variable La marche continue de l'appareil est relativement facile à organiser, elle exigera seulement une forte dépense annuelle, mais elle fournira des documents importants, utiles à toutes les

---

([1]) On suppose que la chambre et le collimateur du spectrographe ont la même distance focale

recherches présentes et futures, et constituant en quelque sorte l'histoire complète du Soleil ».

Les lignes précédentes écrites en 1893 peuvent être maintenues encore intégralement, j'ajouterai que les seconds spectrographes enregistrent avec les vitesses radiales les détails des renversements qui, pour l'étude générale de l'atmosphère solaire, prennent une importance tous les jours croissante.

Les deux appareils, le premier à un prisme et à faible dispersion, le second à un réseau et à forte dispersion, ont été placés à Paris d'abord sur une même table, puis sur deux tables séparées, mais sans recevoir en même temps la lumière d'un même objectif, car cette disposition, recommandée dans la Note précédente pour un enregistrement absolument continu des formes et des vitesses, n'avait pas sa raison d'être, puisque les ressources du laboratoire permettaient de faire au plus en moyenne deux à trois épreuves par jour.

A Meudon les appareils ont été réunis sur la table unique du bâtiment annexe, comme le montre la vue générale de la case C (*Pl. I*).

La partie ouest de la table est occupée par le spectrohéliographe à un prisme et la partie est par le spectrohéliographe à réseau, qui, plus volumineux, se développe sur des consoles additionnelles.

Chaque spectrographe, comme on l'a annoncé déjà au chapitre précédent, peut être employé indifféremment à la photographie des formes ou des vitesses. Leur emploi est exactement le suivant.

Le spectrographe à faible dispersion donne : 1° la photographie des formes de la chromosphère entière avec le mouvement continu de l'appareil et l'isolement de la raie K_2 (1), 2° l'enregistrement des vitesses de la chromosphère au bord et des protubérances avec le mouvement discontinu et la même raie K_2.

Le spectrographe à forte dispersion donne : 1° l'enregistrement des vitesses et des détails des renversements, avec le mouvement discontinu et la raie K_2, 2° la photographie des formes des va-

(1) Il est bien entendu que, dans tous les cas où l'on isole la raie K_2, on pourrait employer aussi la raie H_2. Même Hale affirme que cette dernière, moins intense, donne parfois plus de détails.

peurs à raie noire, par l'isolement de chaque raie noire et avec le mouvement continu de l'appareil

Ce spectrographe a été employé aussi, mais avec des dispositions différentes, pour enregistrer, non plus seulement la raie K_2 et son voisinage immédiat, mais une grande longueur du spectre, par des sections successives dans des regions interessantes du Soleil Car on conçoit aisément qu'il est utile d'avoir une étendue du spectre aussi grande que possible, mais alors, nécessairement, la depense en plaques est beaucoup plus grande.

Dans ce cas particulier, sur lequel je n'ai pas encore insisté, les spectres sont juxtaposés, non plus dans le sens de la longueur du spectre, mais dans le sens de sa hauteur Le mouvement du spectrographe tout entier est le mouvement discontinu habituel, mais les mouvements de la plaque photographique sont différents Cette troisième application du spectrographe à forte dispersion correspond à ce qu'on peut appeler *l'enregistrement des spectres,* qui se distingue de l'enregistrement des formes et aussi de l'enregistrement des vitesses radiales ([1]) Cette disposition spéciale du spectrographe à forte dispersion sera exposée plus loin avec details

Dans toutes ces applications, les spectrographes ont tantôt un mouvement continu, tantôt un mouvement discontinu, qui sont assurés, à Meudon, par les mêmes organes accessoires Je décrirai successivement

1° L'organe du mouvement continu de la table et des spectrographes,

2° L'organe du mouvement discontinu,

3° Le spectrographe à faible dispersion,

4° Le spectrographe à forte dispersion,

5° Le même spectrographe organisé pour l'enregistrement des spectres

Organe du mouvement continu Poids moteur — J'ai essayé d'abord une vis qui est reliée à une coulisse et que fait tourner un mouvement d'horlogerie, muni d'un régulateur à ailettes Le mouvement de la coulisse est transmis à la table et aux spectro-

---

([1]) L'enregistrement des spectres donne aussi l'enregistrement des vitesses.

graphes par un levier dont les deux bras, situés sur une même ligne droite, ont une longueur totale constante, mais un rapport variable à volonté. Mais la vis et le régulateur étaient de qualité médiocre, et leurs imperfections se transmettaient à l'image solaire.

J'ai adopté alors la solution dite *de la clepsydre,* qui est peu coûteuse et est employée depuis longtemps pour uniformiser les mouvements. Un poids moteur entraîne la table mobile et aussi un piston qui comprime un liquide forcé de s'écouler par une petite fente étroite, variable à volonté.

Le poids est de beaucoup supérieur à celui qui est nécessaire pour faire mouvoir la table, il sert surtout à vaincre le frottement du liquide qui, bientôt, prend une vitesse constante d'écoulement. Les petites résistances accidentelles qui se produisent dans le mouvement de l'ensemble sont beaucoup plus faibles que le frottement du liquide, et la vitesse se maintient régulièrement constante et sans à-coups.

La clepsydre adoptée, après plusieurs essais et transformations, est visible à l'extrême droite dans les cases C des planches I et II ; elle est portée par une table fixe en bois, scellée au parquet, de même que l'organe du mouvement discontinu, placé de l'autre côté à l'extrême gauche et visible dans la case C de la planche I et la case D de la planche II. Les tables en bois des deux organes sont reliées par des fers cornières qui passent sous la grande table principale, dans les interstices des côtés Est et Ouest.

Le poids moteur repose sur la partie médiane de ces fers cornières fixes et est caché dans la vue générale de la planche I case C, il est représenté seul dans la planche II case A, et, d'autre part, est dessiné à sa place exacte dans la figure 5. Il entraîne horizontalement la table et la clepsydre par l'intermédiaire d'un levier coudé qui tourne autour d'un couteau.

Le bras horizontal du levier porte les poids et l'extrémité du bras vertical tire la grande table avec une corde métallique flexible. La force verticale est ainsi transformée en force horizontale sans aucun frottement nuisible. Le déplacement du poids est d'ailleurs très faible, environ 40^{mm}.

La clepsydre, d'autre part, comprend : 1° un cylindre horizontal inférieur divisé, par un piston mobile, en deux parties *a* et *b*. Le piston est relié aux parois par un cuir, et à la grande

table et au poids moteur par une tige de longueur variable, 2° un cylindre horizontal supérieur divisé par une cloison fixe (*voir* la figure 5) en deux parties *a'* et *b'*

Les compartiments *a* et *a'* des deux cylindres sont réunis par deux tubes verticaux, l'un des tubes est bouché plus ou moins par une vis pointeau *c* et l'autre porte un robinet à large ouverture *d* et l'ensemble est rempli de glycérine qui s'élève à peu près jusqu'au milieu de *a'* De même les compartiments *b* et *b'* sont réunis par un tube vertical, mais sans robinet, et sont aussi remplis de glycérine jusqu'à la même hauteur à peu près

Le récipient *a'* est relié d'une part à une petite pompe de compression *f*, d'autre part à l'air extérieur par l'intermédiaire d'un robinet *e* Le récipient *b* est constamment en communication avec l'air extérieur

L'appareil fonctionne de la manière suivante Le poids moteur entraîne la grande table et le piston Le cuir s'applique contre les parois et la glycérine est obligée de monter dans le récipient *a* par le trou plus ou moins large de la vis pointeau, le robinet *d* étant fermé, le robinet *e* ouvert En même temps la glycérine descend de l'autre côte du piston dans la partie *bb'*

Le poids moteur étant abaissé, et le spectrographe ayant fait son œuvre, il s'agit de préparer de nouveau l'organe à une nouvelle epreuve. On ouvre le robinet *d*, on ferme le robinet *e*, et, avec la pompe, on comprime l'air dans le compartiment *a'* Lorsque la pression est suffisante, le piston reprend sa marche en sens inverse, entraînant avec lui la grande table et le poids moteur qui reprennent leur position du début Ce retour en arrière se fait rapidement, parce que la glycérine n'est plus astreinte à passer par le trou étroit de la vis pointeau, mais peut s'écouler par le trou large du robinet *d* On ferme alors le robinet *d*, on ouvre le robinet *e*, et l'appareil tout entier (grande table et organe du mouvement continu) est prêt de nouveau pour une seconde épreuve avec le spectrographe

La manœuvre est simple et pratique, et l'on conçoit que, avec un grand réservoir à air comprimé, elle puisse s'adapter aisément a un enregistrement automatique continu

Le piston, d'autre part, a un mouvement suffisamment régulier mais la vitesse, pour une même ouverture de la vis pointeau, est

variable avec la température, et de plus les bulles d'air et les petites saletés détachées des cuirs sont la cause de petites perturbations.

En réalité, le dispositif essayé au début, qui comprend une vis et un mouvement d'horlogerie, est capable de fournir une solution meilleure, mais à la condition d'avoir une perfection suffisante.

Organe du mouvement discontinu. — Le deuxième organe d'entraînement est à l'autre extrémité, du côté ouest. Il est simple et constitue par une vis qui, à intervalles réguliers, tourne d'un petit angle, entraînée par un mouvement d'horlogerie. Les pièces du mécanisme peuvent être de qualité très ordinaire. La vis (*v* sur la figure 5) fait mouvoir une coulisse qui est fixée à la grande table par une tige de longueur variable et munie à ses extrémités de joints à la cardan (*voir* aussi la case D de la planche II). La coulisse elle-même est mobile sur billes, de manière que le frottement soit réduit autant que possible. La vis porte à son extrémité ouest une roue à dents, dont le nombre est en général de 18, et d'autre part, une petite bielle, articulée a une manivelle qui tourne, et courbée à l'autre extrémité, se déplace le long des dents, de manière à faire tourner la roue et la vis de $\frac{1}{18}$ de tour, pour un tour entier de la manivelle. Comme la vis a un pas de 3^{mm}, la coulisse et la table se déplacent chaque fois de $\frac{1}{6}$ de millimètre. On peut d'ailleurs remplacer la roue de 18 dents par des roues ayant un nombre de dents inférieur ou supérieur, et modifier ainsi le petit déplacement imposé périodiquement à la grande table.

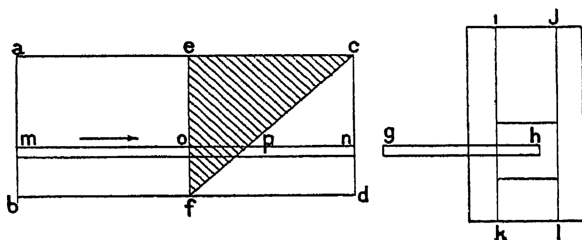
La manivelle, d'autre part, tourne entraînée par le mouvement d'horlogerie (*hh* sur la figure 5), qui est un simple tourne-broche amenagé tant bien que mal pour cet usage spécial. Deux jeux d'engrenages lui font faire à volonté un tour entier, soit en 5 secondes, soit en 10 secondes, et il faut que, dans ce court intervalle, (10 secondes par exemple), le spectrographe se déplace de $0^{mm},16$ et en plus produise sur la plaque photographique l'impression d'un petit spectre. Or, le plus souvent, une moitié de l'intervalle est consacrée au déplacement et à ce qu'on pourrait appeler le tassement du spectrographe, et l'autre moitié à l'impression photographique. Pendant la première moitié, la fente du spectro-

graphe doit être couverte et ne laisser passer aucune lumière, pendant l'autre moitié, elle doit être découverte assez longtemps pour que l'impression soit suffisante.

Toutes ces conditions sont réalisées facilement par une transmission électrique des mouvements de la roue manivelle aux deux curseurs, qui sont placés devant les fentes des deux spectrographes (voir *Pl. II*, case B), et doivent au moment voulu couvrir et découvrir les fentes. Les curseurs, qui sont minces et en aluminium, sont mobiles autour d'un axe situé sur le prolongement de la fente, et portent à leur extrémité un petit morceau de fer doux, attirable par un électro-aimant voisin. Dans la position normale, le curseur masque la fente, mais, si un courant passe dans l'électro-aimant, le curseur est déplacé et laisse passer la lumière.

D'autre part, la roue manivelle porte sur son axe un tambour spécial qui est représenté développé dans la figure 6, ci-contre,

Fig. 6



abcd, tambour développé,
efc, partie métallique,
gh, tige métallique portée par la coulisse *ijkl*, qui frotte contre le tambour,
mn, traînée de la tige métallique sur le tambour pour la position actuelle de la tige

en *ac* et *bd*. Une partie du tambour *efc*, qui, sur le dessin, se distingue par des hachures, est métallique, les autres parties du tambour étant non conductrices.

De plus, une tige métallique *gh*, portée par une coulisse parallèle à l'axe du tambour, frotte sur le tambour, et *mn* est la traînée de cette tige pour la position actuelle de la coulisse. La partie métallique du tambour et la tige *gh* sont les deux extrémités d'un cir-

cuit électrique qui comprend une pile et l'électro-aimant des curseurs devant les fentes des deux spectrographes.

La manivelle, qui déplace la roue à dents, et le tambour sont orientés l'un par rapport à l'autre, de telle sorte que le déplacement des spectrographes commence lorsque la tige *gh* est en *m*, et le déplacement est terminé depuis quelque temps déjà lorsque cette tige est au milieu *o* de *mm*, c'est-à-dire 2s,5 après, lorsque la durée de la rotation est de 5 secondes, le spectrographe et la plaque photographique, qui, comme on le verra plus loin, suit le mouvement, ont ainsi le temps de bien s'arrêter et d'éteindre leurs vibrations. Puis, lorsque la tige métallique *gh* touche la partie métallique du tambour, le circuit électrique est fermé et l'électro-aimant agit sur les curseurs qui découvrent les fentes, lorsque la tige est en *p*, le contact électrique cesse et de nouveau l'accès de la lumière est fermé au spectrographe. Lorsque la tige est de nouveau en *m*, la même série d'opérations recommence et pour une nouvelle section dans l'image du Soleil, puisque le spectrographe s'est déplacé de 0mm,16 devant l'image fixe du Soleil.

Tel est l'organe du mouvement discontinu, que j'ai décrit avec détails, parce qu'il est le seul employé jusqu'à présent dans les observations solaires, les autres observatoires se bornant à l'enregistrement des formes.

Cet organe fonctionne avec régularité et donne de bons résultats, mais il n'est pas présenté comme le meilleur pour le but à atteindre (1). D'une manière générale, il est mauvais d'imposer à une masse aussi grosse que la grande table des déplacements de cette nature, avec des vitesses variables; il faut donner au système une force vive qui est notable à cause de sa masse, et ensuite l'éteindre. Une solution plus élégante, au point de vue mécanique, consisterait à laisser la table et les spectrographes immobiles et à déplacer la fente seule de beaucoup plus légère, et naturellement aussi la plaque photographique. Ce dispositif est, comme on sait,

(1) La bielle, recourbée à une extrémité, qui se déplace le long des dents, et, à intervalles réguliers, entraîne la roue à dents et le spectrographe, l'entraîne d'abord avec une vitesse qui est notable, puis qui diminue et devient nulle à la fin du mouvement. Il vaudrait mieux que, au début du mouvement, la vitesse fût également nulle, ce qui peut être réalisé sans grandes complications. Ce perfectionnement sera adapté prochainement à l'appareil.

celui employé en 1892 et 1893 par Hale à Chicago pour la *photographie des formes,* et, pour cet usage, il offrait des inconvénients sérieux, qui, à cause de la largeur de la seconde fente, sont négligeables dans l'enregistrement des vitesses.

Cette dernière solution est plus compliquée et coûteuse, car elle ne s'applique pas à la photographie des formes et comporte une transmission plus difficile du mouvement à la plaque photographique. Mais, comme elle assure l'enregistrement des vitesses avec la rapidité maxima, elle a sa place marquée dans une organisation plus complète.

Spectrographe à faible dispersion. Agrandissement direct de l'image par le spectrographe. Lumière diffuse à l'intérieur de l'appareil. — Après avoir étudié les grands mouvements principaux de la table et des spectrographes, il reste à décrire les spectrographes eux-mêmes, et en particulier le mode de transmission des mouvements à la plaque photographique, qui doit avoir un déplacement proportionnel.

Dans le spectrographe des formes de Paris, et dans les deux spectrographes de Meudon, la plaque a, par rapport à la seconde fente, un déplacement plus grand que celui du spectrographe par rapport à l'image fixe du Soleil, car la chambre a une longueur plus grande que le collimateur. Cette inégalité exclut la solution simple, préconisée et employée par Hale, adoptée par plusieurs autres observateurs, qui permet d'avoir la plaque fixée au sol ou au bâti, le spectrographe entier avec ses deux fentes se déplaçant seul. Il est alors nécessaire que le collimateur et la lunette aient la même distance focale, et que la lunette, à l'aide d'un miroir auxiliaire, soit rendue parallèle au collimateur. Après avoir employé ce dispositif dans mes premiers essais, je l'ai abandonné, parce qu'il ne permet pas l'agrandissement direct de l'image solaire par le spectrographe, agrandissement qui m'a paru avantageux.

D'autre part, le mouvement de la plaque est plus difficile à réaliser, surtout avec le sidérostat polaire, mais la difficulté n'est pas insurmontable.

Le spectrographe à faible dispersion comprend un collimateur avec une première fente, un prisme de 60° en flint ordinaire, une chambre avec une seconde fente, et une plaque photographique

mobile (*voir* la planche I, case C et la planche II, case D)

Dans le premier spectrographe, organisé en 1898, les pièces optiques étaient, avec le prisme, une lentille à deux verres, de $0^{m},28$ de distance focale et $0^{m},06$ d'ouverture au collimateur, et une lentille simple de crown, de $0^{m},06$ d'ouverture et $0^{m},80$ de distance focale à la chambre Ses images étaient très lumineuses et très nettes au centre du Soleil, et c'est avec ces lentilles qu'on a obtenu la chromosphère de 1899, décrite ci-dessus, qui montre la division en grains Mais le champ de nettete n'est pas plan avec ces lentilles, qui pour le bord solaire n'étaient plus exactement au point et avaient, en plus, de l'astigmatisme

J'ai été conduit en 1900 à employer au collimateur un objectif double à quatre verres, de $0^{m},33$ de distance focale, et à la chambre une lentille à trois verres collés, de 1^{m} de distance focale L'image solaire, large de 93^{mm}, est nette uniformément sur la surface; par contre, elle a une proportion plus grande de lumière diffuse, et elle exige une pose plus grande, au moins double

La lumière diffuse, développée dans l'appareil lui-même, doit en effet être réduite le plus possible, car elle noie dans un fond lumineux uniforme les détails faibles de l'image. Elle augmente avec l'ouverture de l'objectif astronomique, avec le nombre et les défauts des surfaces optiques rencontrées à l'intérieur du spectrographe Les diaphragmes ordinaires, recouverts de velours, placés à l'intérieur pour arrêter tous les rayons parasites, sont utiles mais insuffisants Il faudrait trouver un absorbant, fixé sur gélatine entre deux verres, qui soit transparent pour la raie K_2 et ses environs immédiats, mais qui arrête les autres parties du spectre photographique, à ma connaissance, un absorbant de cette nature n'a pas encore été signalé Une solution complète de la difficulté est fournie, comme on l'a vu plus haut, par le spectrographe à trois fentes, mais il en résulte une complication sérieuse et une perte notable de lumière

Détails sur les deux fentes, et leur réglage — Ces deux fentes, qui sont la première fente ou fente du collimateur, et la deuxième fente ou fente de la chambre, sont courbes, chacune ayant une courbure deux fois plus grande que celle qu'elle aurait si l'autre était simplement droite Cette combinaison des courbures, suivant

la règle indiquée par Wadsworth, assure des images solaires parfaitement rondes

Dans les premières images de Paris, la fente collimatrice était droite, et l'autre, par la propriété bien connue des prismes, était courbe, et il en resultait une déformation notable du cercle solaire, bien visible sur les épreuves publiées à cette époque Or les fentes courbes étaient alors considérées comme difficiles à construire et l'on avait tendance à les éviter, mais on les construit maintenant aussi bien que les fentes droites

Toutes les fentes des spectrographes, à Meudon, sont en nickel et construites par la maison Peslin L'astronome donne seulement le rayon de courbure des joues, determiné avec soin sur ses épreuves, et le constructeur, après avoir obtenu par rodage deux joues en verre de cette courbure, termine la joue en nickel par rodage également, avec la joue en verre correspondante

A la fente collimatrice, l'une des joues est fixe, l'autre est mobile avec une vis micrométrique, et de plus peut être tournée légèrement dans son plan, de manière à être rendue parallèle à la joue fixe (*voir* la fente de droite dans la case B de la planche II).

La fente de la chambre (qui est cachée par le châssis photographique dans la case D de la même planche) a ses deux joues mobiles, mais inégalement, car les deux joues peuvent être déplacées ensemble dans le sens de la longueur du spectre, et l'une des joues, appelée *joue mobile,* peut se mouvoir en plus par rapport à l'autre dans le même sens et donc ouvrir ou fermer plus ou moins la fente Ce résultat est obtenu par deux coulisses superposees une première coulisse en fer, très stable et solide, qui porte la joue à un seul mouvement, dite *fixe,* et une seconde coulisse, plus petite, portée par la précédente, et à laquelle est fixée la joue munie de deux mouvements, dite *joue mobile.* Les deux coulisses ont chacune une vis a micromètre et tambour divisé, le pas de la vis étant exactement de $0^{mm},5$, de même un microscope à micromètre, appartenant au laboratoire, a une vis d'un pas égal, et, de cette manière, une petite longueur mesurée au microscope peut être reportée dans le plan commun des deux joues par le déplacement de l'une ou des deux réunies

Les joues elles-mêmes, pour la commodité des mouvements de la plaque, sont en porte à-faux par rapport aux coulisses, étant

soutenues par des pièces solides en aluminium qui sont fixées aux deux coulisses, et les rapprochent de la plaque Elles sont exactement dans le même plan, et toutes deux peuvent tourner séparément dans ce plan Dans ces conditions le réglage des joues et de la fente est facile, et on les amène aisément en coïncidence avec une raie quelconque du spectre

Il faut signaler en plus une lunette auxiliaire qui sert à rectifier les variations de la dispersion dues aux changements de température du prisme, la raie se déplace par rapport a la seconde fente qui doit suivre le déplacement Un prisme à réflexion totale, fixé à la grande coulisse qui porte la joue dite fixe, renvoie une petite portion du spectre violet vers le réticule d'un micromètre porté par la même coulisse, le réticule est repéré sur une raie violette nette, lorsque la raie K_2 est isolée par la seconde fente, et il suffit de déplacer la grande coulisse, de manière que la raie repère reste toujours sur le reticule

Dans l appareil de Paris, dont plusieurs parties étaient en bois, l'isolement de la raie K_2 par la seconde fente était souvent dérangé, mais à Meudon, toutes les pièces importantes sont métalliques et bien reliées ensemble, et le réglage de la raie K_2, avec le concours de la lunette auxiliaire, se maintient sans dérangement sensible, pendant plusieurs semaines Le spectrographe est toujours prêt à fonctionner.

Détails sur le mouvement de la plaque photographique. Système simple de leviers, et chariots porte-plaques — Le déplacement proportionnel de la plaque photographique est la partie la plus délicate et la plus difficile à organiser, il doit avoir lieu suivant une droite très inclinee sur l'horizon, comme on le voit facilement sur la case C de la planche I et la case D de la planche II

A Paris, avec le rayon solaire horizontal tous les mouvements étaient eux-mêmes horizontaux, et la difficulté beaucoup moindre, Un petit chariot à quatre roues et deux essieux, et dont les essieux tournaient autour de pointes en acier (au nombre de quatre seulement), portait le châssis photographique et était entraîné par un système simple de leviers, qui d'ailleurs a ete employé dans toutes les recherches ultérieures.

Les leviers étaient alors seulement un peu frêles, mais, comme la résistance à vaincre était minime, ils ont suffi pour les belles épreuves de 1894, publiées déjà dans plusieurs recueils Leur disposition générale, qui n'a pas été changée depuis, et qui est indiquée dans la case C de la planche I et la case D de la planche II, est la suivante deux bras en aluminium sont fixés sur un axe commun, et de manière à faire entre eux un angle qui est variable a volonte, mais qui ensuite est rendu fixe, l'axe, lui-même, qui est en acier, est porté par un support en fonte et par l'intermédiaire de pointes en acier, ce qui réduit beaucoup les frottements de rotation L'un des bras a une longueur fixe de 60^{cm} et est perpendiculaire au déplacement de la plaque photographique, l'autre, qui a une longueur plus petite, variable à volonté, est perpendiculaire au deplacement de la grande table et du spectrographe Chaque bras porte à son extrémité, par l'intermédiaire d'un joint à la cardan, une tige de cuivre, qui porte aussi à son extrémité un autre joint à la cardan, et la distance entre les deux joints peut varier par un simple glissement de la tige Or, le support en fonte du système de leviers est fixé à la table du spectrographe et entraîné avec elle, le grand bras étant relié par sa tige au châssis photographique, et le petit bras d'autre part à un point fixe extérieur qui est le grand butoir en métal du premier plan dans la case C de la planche I Le déplacement du spectrographe fait tourner les leviers autour de leur axe commun et entraîne un déplacement proportionnel de la plaque photographique Pratiquement, on donne au petit bras la longueur qui assure à l'image solaire la forme exactement circulaire

Le système de leviers représenté dans les dessins des planches I et II, et employé à Meudon, diffère des précédents seulement par une robustesse plus grande de toutes les parties

La transmission du mouvement du spectrographe à la plaque est assurée simplement par l'organe précédent, mais le plus difficile a été de réaliser sans frottements appréciables le mouvement du chariot porte-plaques, car, avec la position inclinée qui est imposée par le sidérostat polaire, les petits chariots simples employés a Paris ne pouvaient suffire

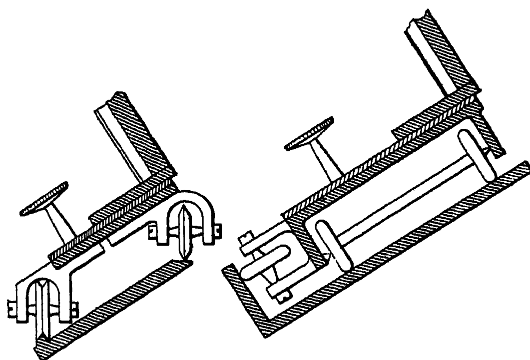
J'ai d'abord fait construire un chariot, maintenu de tous côtés par des billes qui devaient, théoriquement, glisser sans frottement pour toutes les orientations dans l'espace, le résultat a été tres médiocre.

Finalement, je me suis arrêté aux deux dispositifs suivants, indiqués par les deux dessins ci-dessous

On détermine d'abord dans le plan du spectrographe les deux droites inclinées (perpendiculaires à l'axe de la chambre) entre lesquelles le chariot doit se mouvoir, et, par chacune, on fait passer un plan vertical, dans lequel on s'astreint à placer un rail et deux roues sur pointes Les quatre roues, situées à des niveaux différents, sont reliées obliquement à la plaque porte-châssis, parallèle à la grande table, et l'ensemble a un aspect assez étrange Mais le chariot est stable et roule bien sur ses huit pointes Ce dispositif, employé pour le spectrographe à faible dispersion, a donné de bons résultats, il est indiqué dans la coupe ci-contre (*fig* 7) et est représenté dans la case D de la planche II

Il ne convient d'ailleurs que pour une orientation particulière

Fig 7 Fig 8



Coupe perpendiculaire aux rails

du chariot dans le plan de la grande table, aussi ai-je étudié un autre dispositif, qui est plus général et s'applique à toutes les orientations

Dans ce second cas, le chariot roule simultanément sur deux plans qui sont perpendiculaires entre eux, et dans une direction parallèle à leur intersection, supposée perpendiculaire à l'axe optique de la chambre du spectrographe [*voir* la coupe ci-contre (*fig* 8) dans un plan perpendiculaire à l'intersection] Dans le plan principal, parallèle à la grande table, le roulement se fait

avec quatre roues à deux essieux et quatre pointes, dans l'autre plan on a deux roues et quatre pointes En tout six roues et huit pointes Ce chariot est possible à la condition que la verticale de son centre de gravité passe dans le rectangle formé par les deux essieux Cette condition remplie, il s'applique à toutes les orientations, et il a été organisé surtout pour les recherches proprement dites qui exigent le déplacement de la plaque photographique suivant une droite quelconque du plan de la grande table

Le mouvement continu de la plaque devant la seconde fente, qui est de première importance, est assuré par les organes précédents, mais il faut encore donner a la plaque un autre mouvement, secondaire il est vrai, mais indispensable, pour l'éloigner ou la rapprocher à volonté de la seconde fente La plaque est approchée dans un châssis ferme de tous côtés, et doit alors être écartée de la fente, puis, le rideau étant levé, on la place tout contre la fente, et la photographie de l'image solaire peut commencer Cette opération se fait par une rotation autour d'un axe passant à peu près par le plan de la plaque, mais notablement éloigné d'elle, et dans ce but on a prolongé sur le côté gauche (*voir* case D de la planche II) le chariot porte-châssis La rotation est facilitée par une roue dentée et un pignon, et le porte-châssis est fixé dans sa position finale tout près de la fente, par un buton et une vis de serrage D'autre part, l'arrière de la chambre du spectrographe est relié au porte-châssis par un soufflet, souple et imperméable, qui arrête la lumière extérieure tout en permettant les deux mouvements de rotation et de translation Ce système simple est appliqué à tous les chariots porte-plaques de Meudon

Manœuvre générale de l'appareil — Après les explications détaillées qui précèdent, la manœuvre du spectrographe sera facile à comprendre Le poids moteur étant relevé par la pompe de compression et l'image solaire étant à sa place sur un côté de la première fente, on écarte le porte-châssis de la seconde fente, on introduit le châssis, on lève le rideau et l'on approche la plaque photographique de la seconde fente L'appareil est alors prêt pour l'épreuve à faire et, pour la commencer, il suffit d'ouvrir le robinet au-dessus de la vis pointeau, la table entière se met en marche et

s'arrête lorsque le poids moteur est au bas de sa course L'épreuve est alors terminee On écarte le porte-châssis de la seconde fente, et le rideau est baissé, le châssis peut alors être retiré

La durée de l'épreuve est variable suivant la saison, la hauteur du Soleil et l'etat du ciel, elle est comprise en général entre 2 et 6 minutes, mais pour la chromosphère extérieure et les protubérances, notablement plus faibles, la pose est au moins triplée Pour cette seconde épreuve, le disque du Soleil doit être masqué presque entièrement par un diaphragme circulaire, autrement la lumière diffusée dans le spectrographe lui-même serait une gêne sérieuse pour les protubérances

Le diaphragme circulaire doit être fixe, comme l'image solaire elle-même, il est porté par le plafond qui offrait un point d'appui plus commode que le sol de la pièce Dans la vue générale de la case C, planche I, on aperçoit près du trou circulaire qui est percé dans le toit, et laisse passer la lumière solaire, un bâti de bois fixé au plafond, ce bâti a été construit pour porter le diaphragme, et au besoin d'autres pièces accessoires Le diaphragme circulaire est relié a ce bâti par deux coulisses perpendiculaires l'une à l'autre, et munies de tambours divisés, ce qui permet le réglage précis par rapport à l'image solaire Toutes ces pièces sont visibles sur la case B de la planche II et dans la figure (4)

Spectrographe à grande dispersion Remarques générales — Le second spectrographe présente plusieurs points communs avec le premier, la manœuvre et certaines pièces sont les mêmes, aussi la description pourra-t-elle être plus courte

Il a comme organe principal un réseau de Rowland, dit de quatre pouces, ayant 560 traits environ au millimètre, la hauteur des traits est de 55^{mm}, et la longueur de la partie striée atteint 80^{mm} Dans le spectre de quatrième ordre, avec une chambre de 1^{m}, il assure une dispersion presque cinq fois plus grande que le spectrographe précédent, mais la lumière incidente doit se diviser entre les divers ordres de spectres et, dans chaque ordre, la dispersion est plus forte, aussi l'intensité des raies brillantes et surtout du fond lumineux est-elle très diminuée Il faut employer des poses beaucoup plus longues pour la photographie des formes avec les raies brillantes et surtout avec les raies noires solaires D'autre

part, il convient seul pour l'étude détaillée des spectres, et aussi pour l'enregistrement des vitesses radiales faibles.

Les conditions sont d'ailleurs plus favorables qu'en 1892 et 1894, grâce à la sensibilité plus grande des plaques du commerce, qui même s'est accrue notablement depuis l'année dernière.

Le système de leviers qui transmet à la plaque photographique un mouvement proportionnel à celui du spectrographe, est le même que dans l'appareil précédent, il s'adapte également bien à l'enregistrement des vitesses et à l'enregistrement des formes, mais, dans le premier cas, lorsque la seconde fente et le petit spectre qu'elle isole dépassent l'écartement qui correspond à deux sections successives faites sur l'image solaire, il faut modifier le rapport des bras de levier et diminuer encore le petit bras. L'image finale obtenue est alors elliptique, ainsi que dans les premières recherches de 1894, elle se prête moins bien à la comparaison avec les épreuves des formes, mais elle donne plus de détails.

Détails de l'appareil organisé à Paris. — Le spectrographe à grande dispersion, organisé en 1894 et destiné surtout aux vitesses radiales et aux détails des renversements, avait, au collimateur et à la lunette, des lentilles simples en quartz de 1m,30 de distance focale, et le réseau était employé dans le quatrième ordre, de manière à donner la dispersion maxima. La lumière solaire lui était fournie par un objectif de 0m,30 de diamètre et 5m de distance focale. Il n'y avait pas d'agrandissement de l'image par le spectrographe, et la pose cependant devait, pour le bord solaire, atteindre parfois 5 secondes. Les images obtenues, hautes de 5cm, et élargies dans l'autre sens, comme on l'a vu plus haut, étaient petites, elles ont fourni cependant des résultats fort intéressants.

Le réseau qui m'a été envoyé par Rowland lui-même, en 1887, avait des spectres plus intenses d'un côté et dans le quatrième ordre, mais il donnait une proportion considérable de lumière diffuse, comme on peut s'en convaincre en examinant les épreuves des vitesses publiées en 1897 (*Spécimens de photographies astronomiques*, Service de Spectroscopie, Observatoire de Paris, 1897, planche IV). Cette particularité du réseau le rend peu apte à cer-

taines applications astronomiques, par exemple à la Photographie avec les raies noires du spectre.

Organisation de Meudon. — Le spectrographe a été remonté à Meudon avec le même réseau, mais dans des conditions différentes, avec un agrandissement direct de l'image solaire qui, autrement, eût été trop petite.

J'ai employé d'abord un simple spectroscope en bois, avec un collimateur de $0^m,50$, le réseau dans le quatrième ordre et une lunette de 1^m, faisant un angle de 30° environ avec le collimateur. Mais, par mesure d'économie, l'appareil n'avait été muni des accessoires qui permettent un réglage précis de la seconde fente et un mouvement régulier de la plaque photographique. Il permettait seulement l'étude ordinaire des spectres, faite le plus souvent dans le Soleil aux environs des taches et, dans une certaine mesure, l'enregistrement des vitesses radiales.

Spectrohéliographe à trois fentes, à un réseau et à un prisme. — L'année dernière, il a été possible de l'organiser d'une manière plus sérieuse, avec des pièces métalliques, et avec les accessoires nécessaires. Comme la lumière diffuse, notable avec ce réseau, d'après la remarque faite plus haut, était une gêne sérieuse, on a réalisé la disposition dite *du spectrographe à trois fentes,* réclamée déjà en 1893, pour la photographie avec les raies très noires et décrite dans le premier chapitre de ce Mémoire.

Le croquis ci-contre (*fig.* 9) donne un plan schématique de l'appareil qui, d'ailleurs, est représenté en totalité et en partie dans la vue générale de la case C, planche I, et la vue restreinte de la case C, planche II.

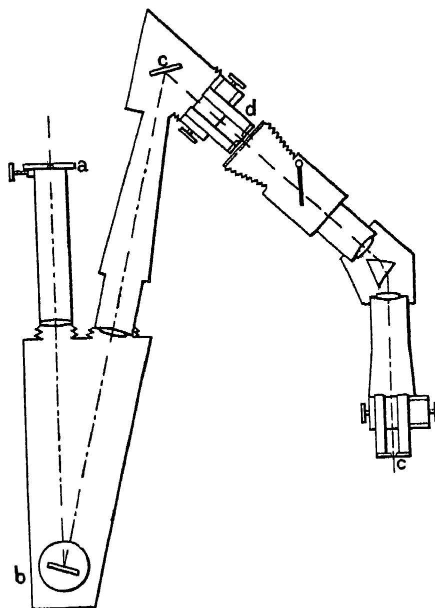
On a prolongé la chambre du spectrographe à réseau par le collimateur d'un second spectrographe, dont la fente collimatrice coïncide avec la seconde fente de l'appareil précédent.

Le second spectrographe est constitué par un collimateur de $0^m,50$, un prisme de 60° en flint très léger et une chambre de $0^m,50$, munie d'une fente que j'appellerai *la troisième,* il ne modifie pas l'agrandissement du simple au double imposé à l'image solaire par le premier spectrographe.

Cependant les deux appareils, placés bout à bout, auraient

occupé une trop grande place, il a fallu les couper en deux par un miroir auxiliaire et replier la seconde partie sur la première, mais l'angle de réflexion a été choisi de telle sorte que la quatrième lunette, ou la chambre du second spectrographe, soit parallèle au premier collimateur, ce qui assure des commodités plus

Fig 9 — Croquis du spectrohéliographe à trois fentes



a, Première fente,
b, Réseau,
c, Miroir plan,
d et *e*, Deuxième et troisième fente

grandes pour le déplacement de la plaque photographique En fait, le chariot qui porte cette dernière roule sur un bâti qui est porté par le sol naturel, et le système de leviers peut alors être beaucoup simplifié

Le spectrohéliographe à trois fentes est un peu plus difficile à régler que l'appareil ordinaire La deuxième fente et la troisième

ont tous les moyens de réglage (et en particulier les lunettes auxiliaires) décrits pour le spectrographe à faible dispersion. Derrière la deuxième fente, il y a un châssis photographique porté par un chariot mobile, et il est possible, avec la seconde fente seule, de faire des épreuves d'essai, ou même des épreuves des formes et des vitesses comme avec la troisième fente. On règle d'abord la deuxième fente et on la maintient sur la raie étudiée par les moyens déjà décrits, et ensuite on passe à la troisième, qui d'ailleurs peut être un peu plus large que la deuxième. Dans le second spectrographe ou spectrographe à prisme, le collimateur et la lunette ont la même longueur, et un déplacement de la seconde fente dans un sens provoque un déplacement contraire, mais égal de la troisième, cette relation simple facilite le réglage définitif.

En fait, ce spectrographe a bien les qualités qui ont été prévues, lorsque la deuxième et troisième fente sont fines, la lumière diffuse est complètement exclue, et cet avantage est précieux avec les raies solaires très noires, et pour la photographie des formes en particulier. Il a donné sur ce dernier terrain des résultats intéressants, mais l'addition du second spectrographe entraîne une perte notable de la lumière déjà faible, de plus, la dispersion par le réseau et la chambre de 1[m] n'est pas suffisante pour isoler certaines raies noires du spectre, particulièrement intéressantes, et aussi pour donner tous les détails des raies K_2 et K_3. J'ai été conduit, au moins momentanément, à un dispositif différent, lequel a été substitué rapidement au précédent. Tous ces appareils en effet ont été construits de manière à être démontés et montés rapidement.

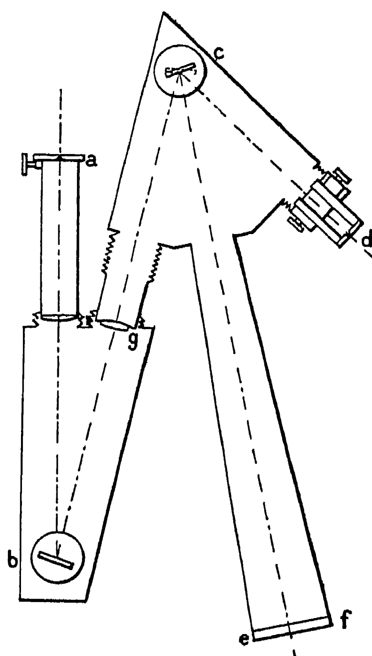
Seconde disposition du spectrographe à réseau. — Le second dispositif est représenté dans le plan schématique ci-joint (*fig.* 10) et dans la case C de la planche VI.

En premier lieu, le réseau ancien a été remplacé par un autre, de mêmes dimensions, qui a la propriété de donner une proportion beaucoup moindre de lumière diffuse, le second spectrographe à prismes n'avait plus la même utilité, on l'a supprimé momentanément, tout en prenant les mesures nécessaires pour le remplacer par un autre plus lumineux, formé par exemple avec des lentilles

simples et un prisme de 30° seulement. De plus la lentille de chambre a été changée et remplacée par une autre ayant $1^{m},50$ de distance focale et formée de verres très transparents. Le mouvement de la plaque est assuré par le système de leviers habituel.

La dispersion et la grandeur de l'image sont augmentées, mais

Fig. 10. — Croquis du second spectrographe à grande dispersion.



a, Première fente,
b, Réseau,
c, Miroir plan,
gcd, Première chambre avec la seconde fente *d*,
gcef, Deuxième chambre sans fente.

le temps de pose nécessaire à une bonne épreuve du spectre, avec le Soleil élevé et les plaques nouvelles, peut ne pas dépasser 1 seconde, aussi le spectrographe convient-il très bien pour l'enregistrement des vitesses radiales, et même avec la plus grande vitesse de l'organe du mouvement discontinu. Je l'ai employé

pour les épreuves des vitesses que j'ai préconisées dans une Note récente des *Comptes rendus* pour l'étude des couches supérieures de la chromosphère (*Comptes rendus*, t. CXLVIII, juin 1904, p. 1375) et dont j'ai rappelé l'utilité dans le précédent Chapitre, page 8.

La seconde fente, large au plus de $0^{mm},4$, isole les raies K_2 et K_3 et une portion très petite du spectre continu voisin, et les sections successives faites par la première fente dans l'image réelle du Soleil sont séparées par un petit intervalle (soit $\frac{1}{6}$ de millimètre) qui, multiplié par 3, est seulement égal à $0^{mm},5$. Dans ces conditions, l'image finale formée de 180 petits spectres juxtaposés, est circulaire et peut être comparée facilement à l'image des formes de même diamètre donnée par le spectrographe à faible dispersion. L'image finale des vitesses, vue de loin, donne les formes générales des plages brillantes et, d'autre part, vue de près, montre les détails des raies renversées du calcium, c'est-à-dire les épaisseurs et les mouvements radiaux des couches superposées de la vapeur dans la chromosphère. Les résultats obtenus avec ces épreuves nouvelles sont en cours de publication, ils font ressortir une fois de plus l'utilité de l'enregistrement spécial des vitesses radiales.

Le même appareil a été employé aussi pour la photographie des formes avec des raies noires isolées par la seconde fente, mais, de même que dans les essais précédents, la longueur de la pose qui est nécessaire est un obstacle sérieux, les épreuves obtenues offrent cependant plusieurs points très dignes d'intérêt.

Propriété géométrique du dispositif employé. — Incidemment je signale une particularité des deux spectrographes précédents à réseau, qui correspond à une propriété géométrique curieuse du dispositif optique formé par l'objectif astronomique et le spectrographe. Le réseau est plus éloigné des deux lentilles qu'on ne le fait d'ordinaire; ce qui diminue la lumière totale et la lumière diffuse introduites dans la chambre. Mais on a cherché surtout à rapprocher le réseau du petit cercle qui correspond à la largeur minima du faisceau total issu de la lentille collimatrice [1].

---

[1] Le réseau n'est pas sur le petit cercle même, pour satisfaire à d'autres conditions imposées par le dispositif à trois fentes.

Ce petit cercle est l'image de l'objectif astronomique donné par cette dernière lentille, il est petit, avec un diamètre égal à 33^{mm}. Un réseau de cette hauteur suffirait donc pour donner une image entière du Soleil avec le spectrohéliographe, il serait encore suffisant et même au delà pour un objectif astronomique plus grand, ayant le même rapport de l'ouverture à la distance focale. Seules les lentilles du collimateur et de la lunette doivent croître en largeur avec l'ouverture de l'objectif astronomique et, lorsque leur diamètre devient trop grand pour la distance focale, on est obligé d'augmenter la distance focale, et aussi la hauteur du réseau.

A priori, il semble au contraire que la faible hauteur des réseaux actuels soit un obstacle à leur emploi pour les grandes images, cela est vrai si, comme dans le grand spectrographe de Hale et Ellermann, le réseau est tout près de la lentille collimatrice. Mais si, dans l'appareil américain, on éloigne le réseau jusqu'à 1^{m}, une hauteur de réseau de 50^{mm} est suffisante pour donner sur une seule épreuve, avec les mêmes lentilles du collimateur et de la lunette, la grande image du Soleil fournie par le grand réfracteur de 20^{m}. Le spectrographe, dans ces conditions nouvelles, ne serait d'ailleurs pas beaucoup plus encombrant que l'appareil actuel. Je ne sais si ces propriétés géométriques ont déjà été signalées, mais elles sont utiles à connaître.

Nouvelle espèce de spectrographes solaires. Enregistrement de spectres étendus, par sections, avec le mouvement discontinu. — Le spectrographe précédent a été complété par une seconde chambre, de distance focale plus grande, et disposée pour l'enregistrement de spectres plus étendus. La nouvelle lentille de chambre, qui se trouvait dans la collection de l'observatoire, est simple, plan-convexe et en quartz, avec une distance focale égale à 2^{m},60, elle est substituée rapidement à l'objectif précédent, les deux barillets étant identiques. Le miroir plan qui renvoie vers le bas les rayons du spectre est tourné de manière à les réfléchir vers un second châssis porte-plaques *ef* qui ne présente pas l'obstacle d'une seconde fente et de ses joues en métal, commme dans l'autre chambre (*fig.* 10). Le spectre est alors facilement plus étendu, et peut comprendre une fraction notable du spectre total. Comme, d'autre part, l'agrandissement par le spectrographe est porté de

trois à cinq, on étudie plus facilement les détails du spectre, des raies K_2 et K_3, en particulier, et aussi les détails de la surface solaire, qui correspondent à une image de $0^{m},15$ de diamètre. Les épreuves montrent, dans les raies noires et dans le spectre continu, une série de faits intéressants, qui sont moins frappants que les phénomènes offerts par les raies du calcium, mais qui doivent également fixer l'attention. Aussi la plaque est-elle portée par un châssis dit *à répétition*, ou autrement dit par une coulisse qui se meut perpendiculairement au plan de la grande table, dans le sens de la hauteur du spectre, et qui permet de substituer rapidement une plaque fraîche à la plaque impressionnée (*voir* la case C de la planche VI).

La pose nécessaire varie entre 2 et 5 secondes avec les plaques les plus sensibles et n'est pas encore trop longue, elle est donnée automatiquement par l'organe du mouvement discontinu, avec cette différence que le déplacement de la plaque est fait à la main, avec l'aide d'un pignon. Les épreuves présentent la juxtaposition de spectres de sections successives équidistantes, faites sur le disque solaire, et en particulier autour des taches. Elles sont en quelque sorte une extension des épreuves du spectrohéliographe des vitesses, qui juxtapose seulement de petites portions étroites du spectre. A cause de la grande longueur du spectre photographié pour chaque section, le déplacement de la plaque n'est plus possible dans le sens de cette longueur, connue dans les spectrographes des vitesses, mais seulement dans le sens perpendiculaire. Cette différence dans le sens du mouvement de la plaque photographique est un des caractères du nouveau spectrographe.

Ces premiers essais montrent l'utilité d'un enregistrement spécial, différent des précédents et plus étendu, que l'on peut appeler l'*enregistrement des spectres*, et qui a seulement le grand inconvénient d'exiger une forte dépense. Pour cette raison, il semble devoir être limité aux parties les plus intéressantes de la surface solaire, c'est-à-dire aux taches et facules, alors que l'enregistrement des formes et des vitesses radiales s'applique aisément au disque entier.

Dans un appareil définitif, consacré à cet enregistrement spécial, il faudrait substituer aux plaques photographiques sur verre des pellicules montées sur rouleaux, qui seules permettent de changer

rapidement la surface sensible à la lumière dans le passage d'une section solaire à la suivante. On pourrait employer un organe de mouvement discontinu semblable à celui précédemment décrit, pour entraîner non le spectrographe entier qui serait immobile, mais seulement la fente du collimateur. Cette dernière solution, comme on l'a vu plus haut, est meilleure au point de vue mécanique, de plus, elle a l'avantage de donner des spectres successifs déplacés les uns par rapport aux autres, et d'une quantité qui est proportionnelle à la distance des sections correspondantes dans l'image solaire. Il est alors plus facile de repérer sur le Soleil la position exacte de la section faite par la première fente, pour chacun des spectres en particulier. Dans l'enregistrement des vitesses radiales, l'image finale offre la forme du Soleil (plus ou moins allongée), et il est relativement aisé de retrouver les coordonnées solaires d'un point quelconque du spectre, dans l'enregistrement des spectres, il faudra prendre des précautions spéciales pour arriver au même résultat.

D'autre part, pour ces épreuves, un objectif astronomique achromatisé pour les rayons chimiques est nécessaire. Aussi l'objectif astronomique de l'observatoire, employé d'ordinaire, qui ne remplit pas cette condition, a été écarté dans cette première étude. Il a été remplacé par un objectif de $0^{m},15$, photographique, de $2^{m},80$ de distance focale, qui nous a été prêté par le Service géographique de l'Armée.

Remarques générales. — Après la description détaillée qui précède, l'organisation des recherches solaires, adoptée à Paris et Meudon, peut être appréciée à sa juste valeur. Elle a été poursuivie dans une indépendance absolue vis-à-vis des recherches similaires de l'étranger, et autour de deux petits appareils astronomiques, jusqu'alors négligés dans l'observatoire, qui sont le sidérostat de Foucault et le sidérostat polaire de Meudon. Elle a donné des résultats assurément dignes d'intérêt, elle est même à certains égards supérieure aux autres organisations semblables, puisqu'elle comporte seule l'enregistrement de deux éléments variables du Soleil, l'épaisseur et la vitesse radiale des vapeurs chromosphériques, qui prennent une importance constamment croissante. A d'autres points de vue, elle est inférieure, par le

nombre et la valeur des appareils astronomiques et spectraux ce qui exclut pour elle complètement ou partiellement les recherches qui exigent une grande concentration de lumière En terminant ce Chapitre j'exprime l'espoir que les Pouvoirs publics accorderont prochainement les crédits strictement nécessaires pour combler cette lacune

P.-S. — L'organisation ci-dessus décrite a été réalisée à Meudon avec l'aide d'un jeune assistant, M. d'Azambuja, dont le zèle et l'intelligence ont été vraiment dignes d'éloges

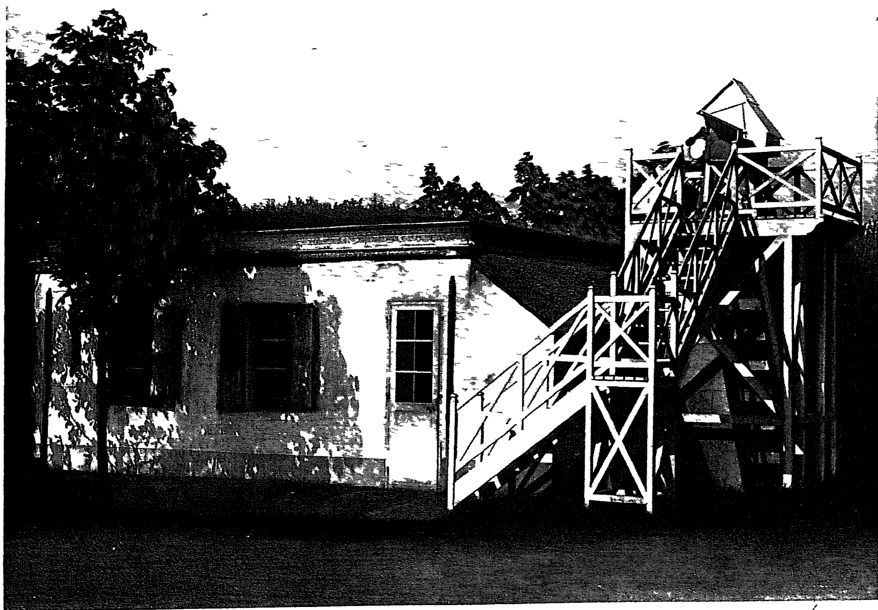
Extrait du *Bulletin astronomique*, août et septembre 1905

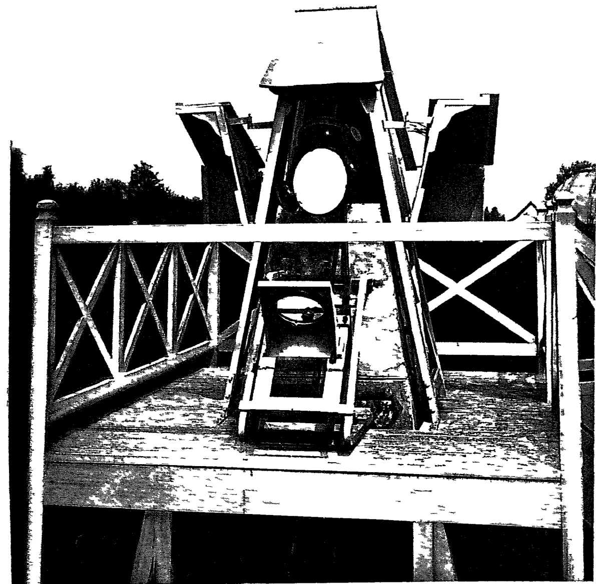
39942 Paris — Imprimerie GAUTHIER-VILLARS, quai des Grands-Augustins 55

Appareils Enregistreurs de l'Atmosphère Solaire

Case A

Case B

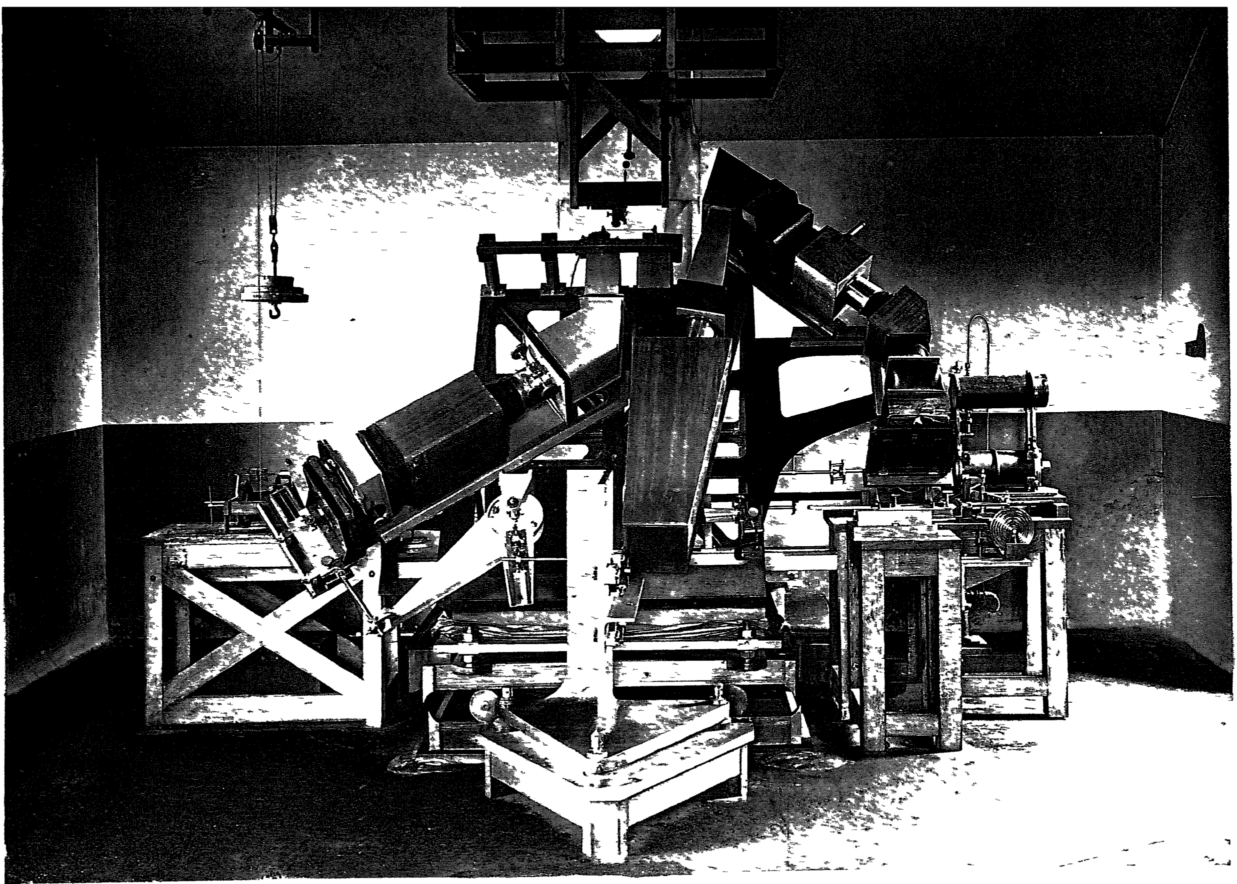




A_Vue generale qui montre 1° le siderostat polaire porte par un pilier eleve 2° la galerie et l'escalier qui le desservent 3° le bâtiment annexe recouvert en terre et en chaume qui contient les appareils enregistreurs

B_ Vue detaillee (prise au Sud) qui montre le siderostat polaire avec sa cabane ouverte la galerie annexe le miroir plan et l'objectif astronomique

Case C

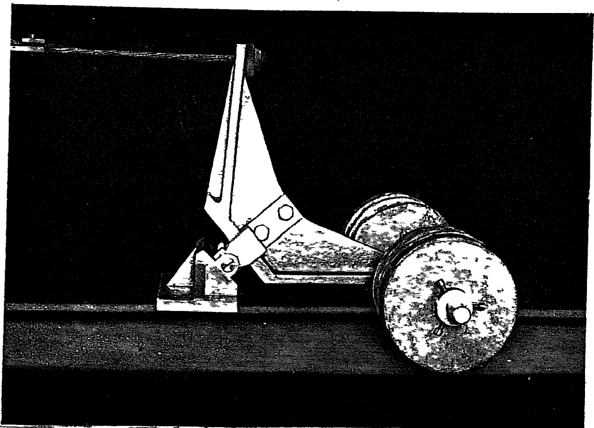


C. — Vue générale à l'intérieur du bâtiment. — Les spectrographes enregistreurs au nombre de deux sont portés par la table centrale inclinée mobile sur deux séries de rails; celui de gauche est à deux fentes et à un prisme; celui de droite est à trois fentes, à un réseau et à un prisme. — A l'extrême gauche est l'organe du mouvement discontinu pour les vitesses radiales; à l'extrême droite est l'organe du mouvement continu pour la photographie des formes. — La pièce du premier plan est un butoir en métal. — La lumière solaire arrive par un trou percé dans le plafond auquel sont fixées plusieurs pièces accessoires.

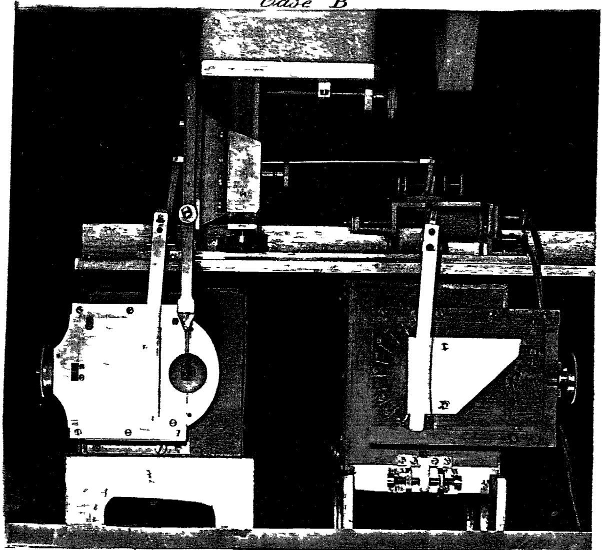
Héliog. & Imp. J. Heuse

Appareils Enregistreurs de l'Atmosphère Solaire

Case A



Case B



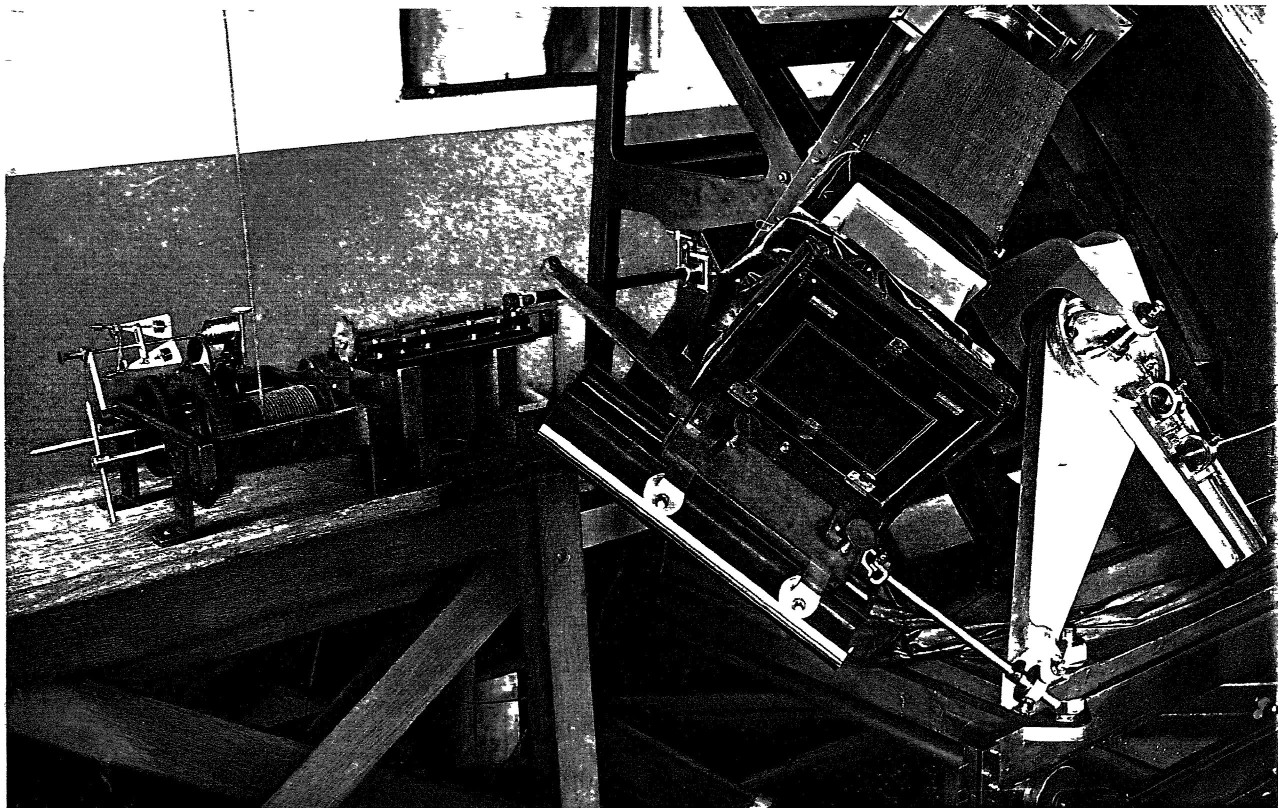
Case C

A _ Pendule moteur placé sur la table qui, en tournant autour d'un couteau entraîne horizontalement la table mobile pour la photographie de [illegible]

... qui, en tournant autour d'un couteau entraine horizontalement la table mobile pour la photographie des formes

B_Vue detaillee qui montre les fentes des deux spectrographes le diaphragme circulaire fixe au plafond et reglable pour l'enregistrement du bord solaire seul et les deux diaphragmes allonges qui etant mus electriquement couvrent et decouvrent les fentes pour la photographie des vitesses radiales

Vue D



C_Vue detaillee qui montre a gauche la partie arriere du spectrographe a trois fentes a un reseau et a un prisme au centre le systeme simple de leviers qui entraine la plaque photographique de ce spectrographe a droite l'organe du mouvement continu (a glycerine et air comprime)

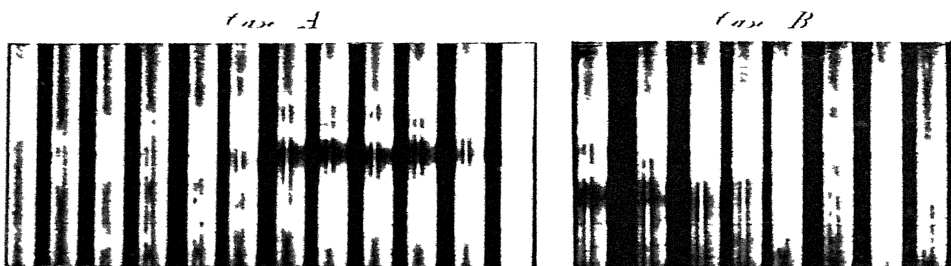
D_Vue detaillee qui montre a gauche l'organe du mouvement discontinu avec sa roue a dents et la coulisse qu'elle entraine au centre l'arriere du spectrographe a deux fentes et a un prisme a droite le systeme de leviers qui entraine la plaque photographique de ce spectrographe

Appareils Enregistreurs de l'Atmosphère Solaire

Enregistrement des Vitesses

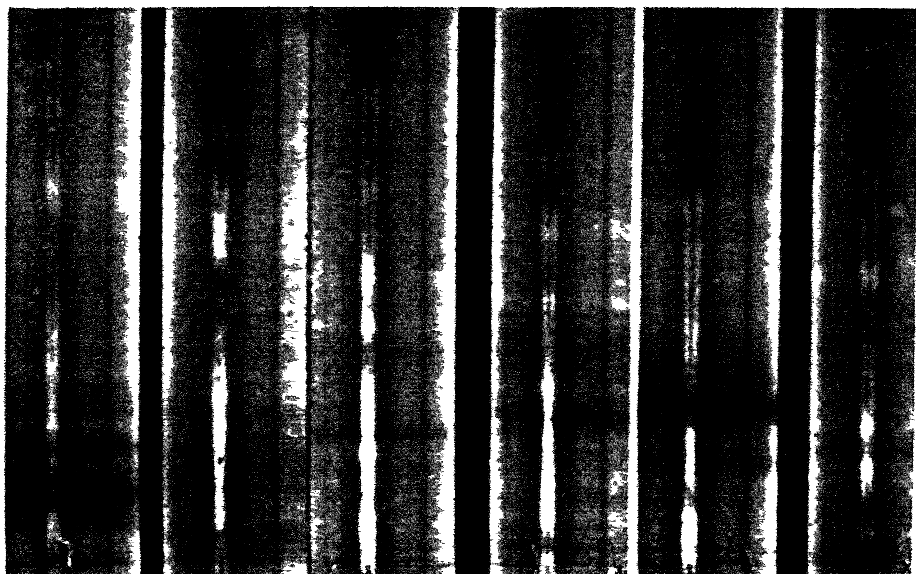
Enregistrement des couches superposées de la vapeur de calcium, de leurs épaisseurs et de leurs vitesses radiales avec la raie K et ses composantes K_1, K_2, K_3, et avec le mouvement discontinu des spectrographes

Cas A Cas B



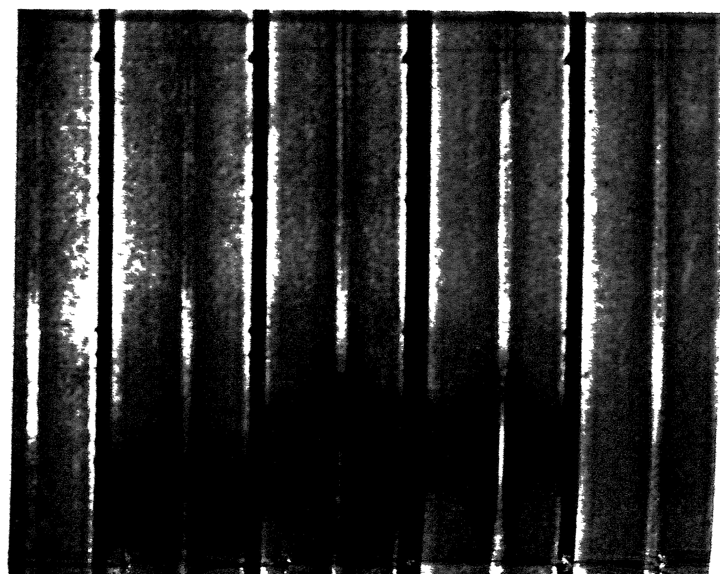


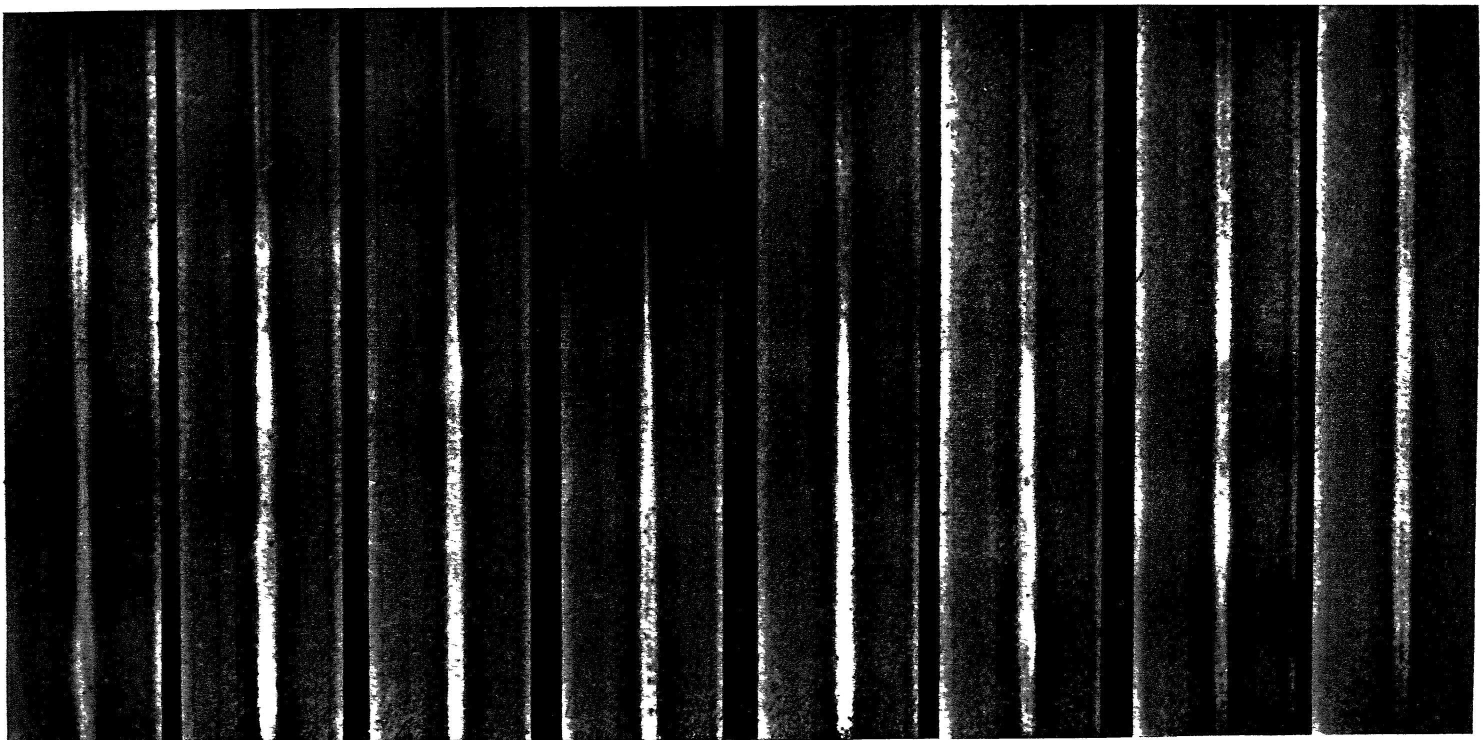
Cas C





Cas D





Case E

Ces épreuves offrent la juxtaposition de spectres de sections successives équidistantes sur le disque solaire les spectres étant restreints au voisinage immédiat de la raie K, et étant obtenus avec le grand spectrographe à réseau (4ème ordre)

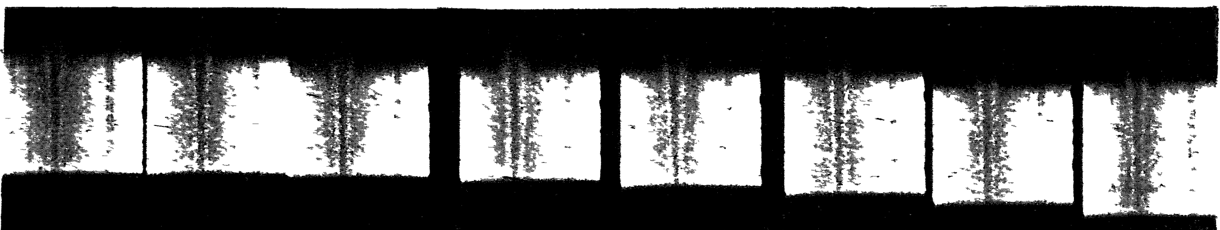
Les cases A et B qui ont été publiées dans une planche du Bulletin Astronomique de Février 1894 se rapportent au Soleil du 9 Février 1893 étudié avec un spectrographe ordinaire, les mouvements de la plaque étant faits à la main Diamètre du Soleil 27^{mm} Agrandissement $\frac{3}{2}$

Les épreuves des cases C D E, ont été obtenues avec un spectrographe automatique Elles se rapportent au Soleil des 18 Mai 31 Mai et 17 Mars 1894 Diamètre du Soleil sur l'épreuve 50^{mm} Agrandissement 18 environ

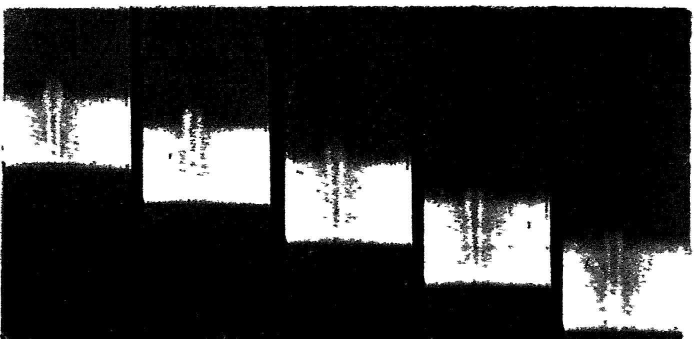
Appareils Enregistreurs de l'Atmosphère Solaire

Enregistrement des Vitesses

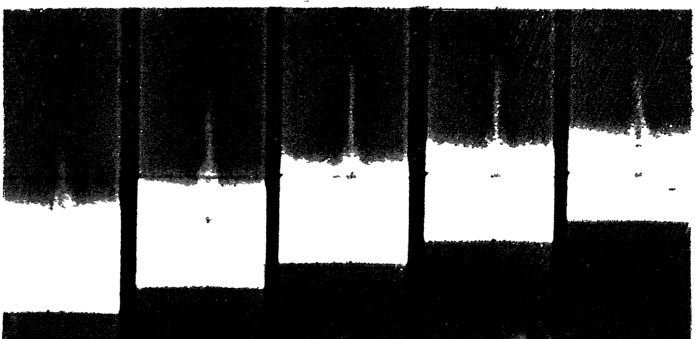
Case A



Case B

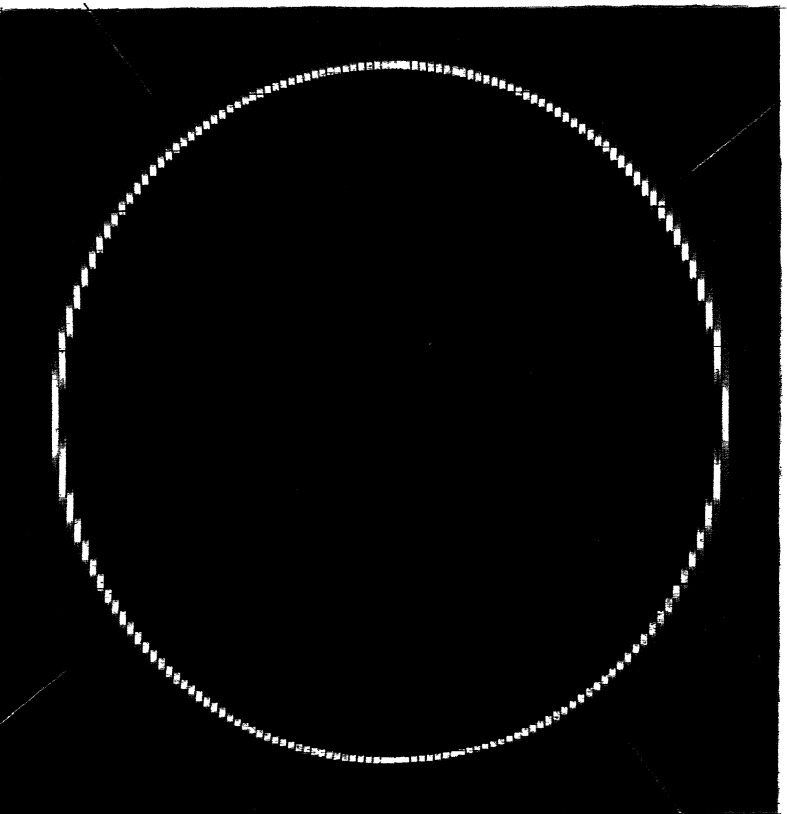


Case C

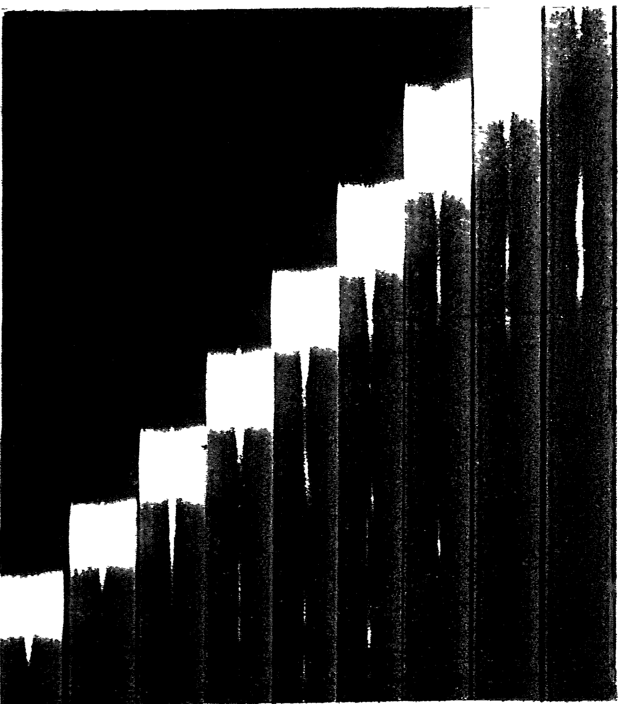


Cases A B C – Agrandissements (de 8 à 10 fois) de portions d'épreuves spectrales du bord solaire par sections successives obtenues avec le mouvement discontinu et avec le spectrographe à réseau qui isole les raies K_1 K_2 et K_3 du calcium et le spectre continu voisin. – L'épreuve de la case A est du 18 Mai 1894 celles des cases B et C sont du 16 Mai 1894. – Ces épreuves

Case D



Case E



Case D – Image du bord solaire par sections successives en vraie grandeur obtenue le 8 Septembre 1902 de $10^h 58$ à $11^h 08$ avec le mouvement discontinu et avec le spectrographe à un prisme qui isole la raie K et le spectre continu voisin – Elle décèle l'épaisseur et la vitesse radiale de la vapeur au bord extérieur

Case E – Agrandissement (10 fois) d'une portion d'une image analogue à celle de la case D obtenue le 16 Novembre 1903 Les vitesses radiales sont notables

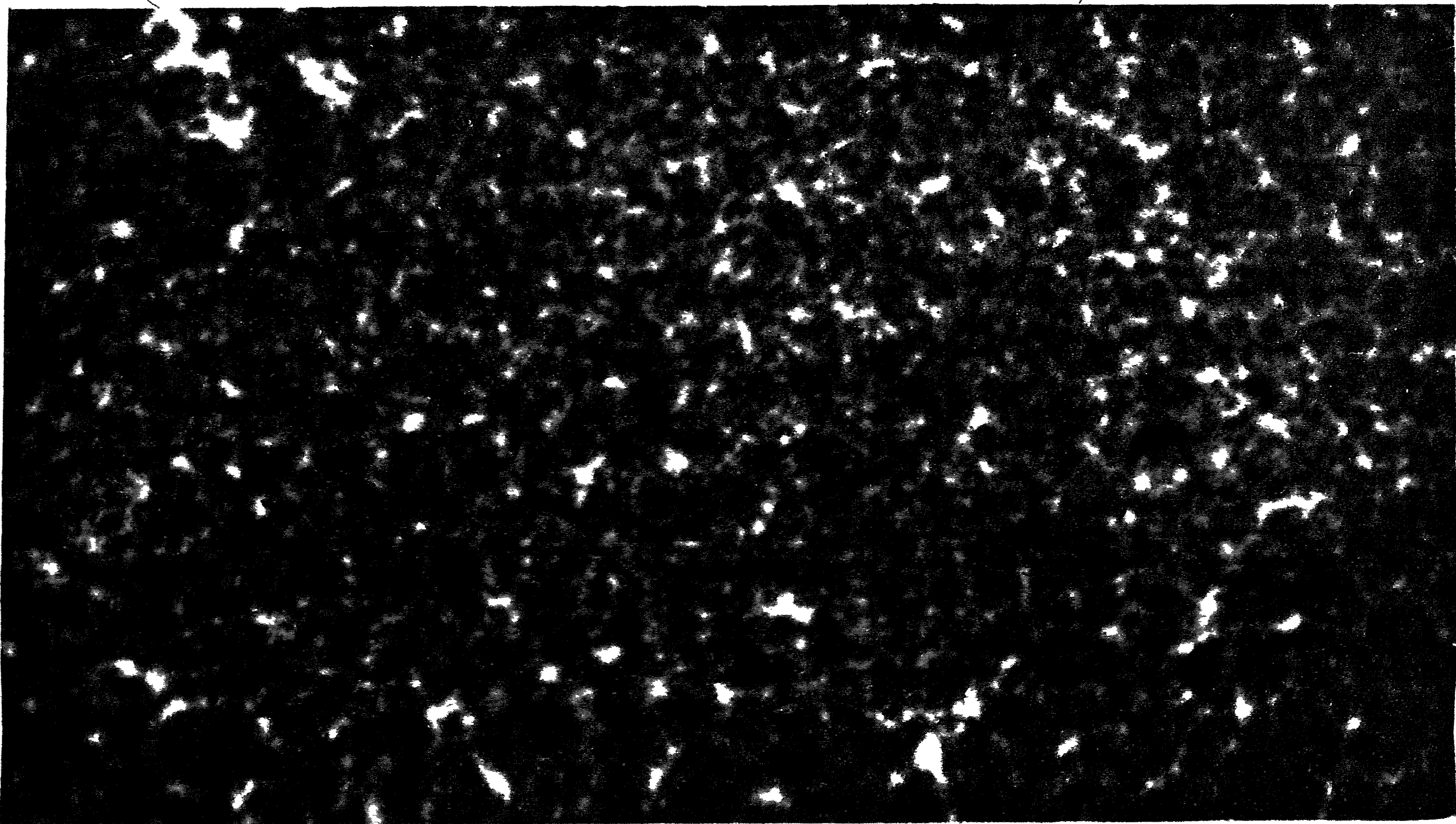
Hel Du ardin

Appareils Enregistreurs de l'Atmosphère Solaire

Enregistrement des Formes

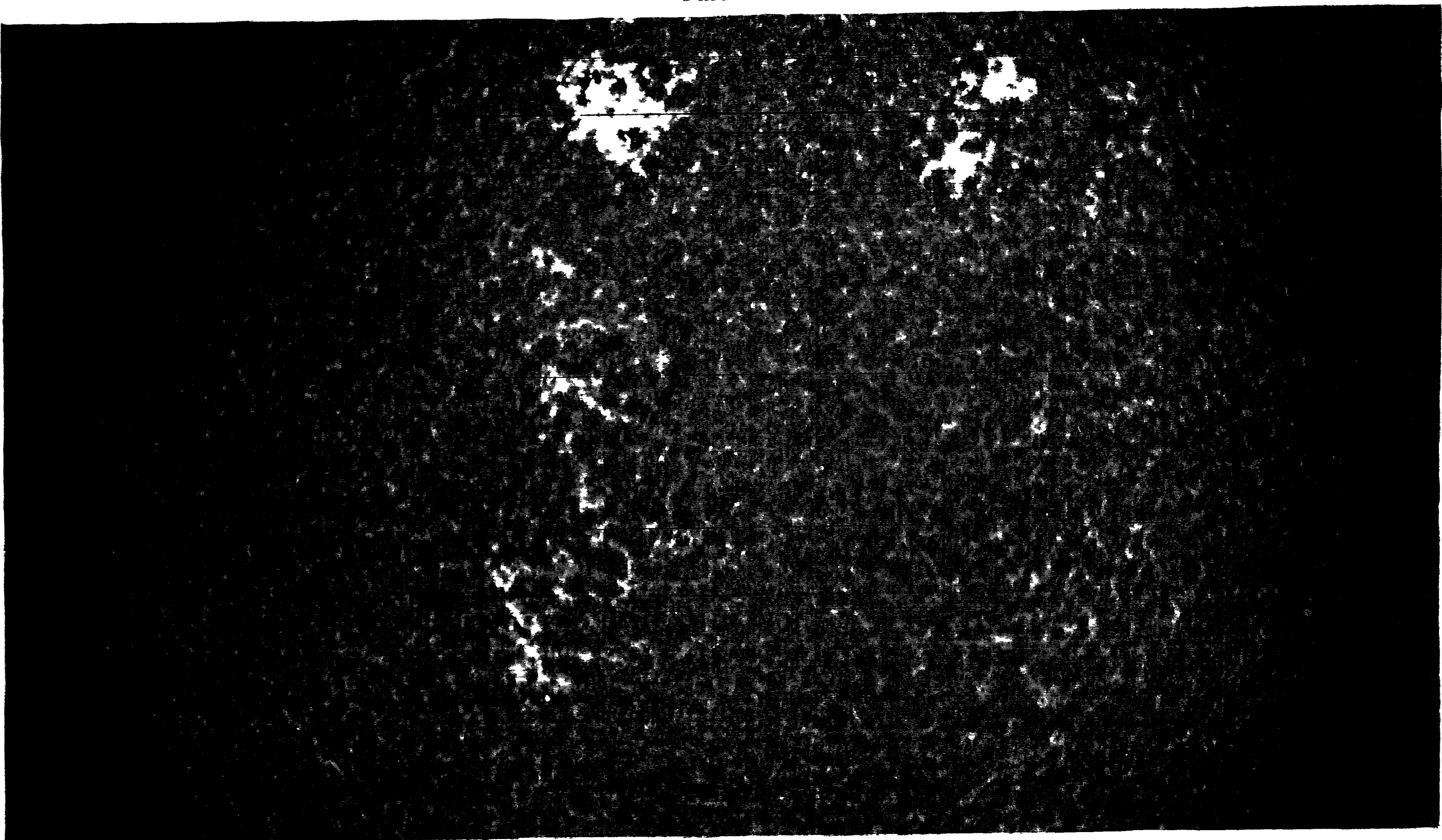
Images de la couche moyenne des vapeurs de calcium ou de la chromosphère proprement dite, obtenues par l'isolement de la raie K_2 du calcium et avec l'organe du mouvement continu, qui assure l'enregistrement des formes

Case A



des plages brillantes en petits grains. Diamètre de l'image originale 85mm. Agrandissement 6 fois. L'image est obtenue avec le spectrographe de petite dispersion à un prisme. Largeur de la seconde fente 0mm,06 et 1Å

Case B



La case B représente une épreuve du 11 Avril 1904 (obtenue avec le même spectrographe de 4h 21m à 4h 28m), qui offre une belle tache et les zônes royales bien distinctes. Diamètre de l'image originale 92mm. Agrandissement 2 fois environ

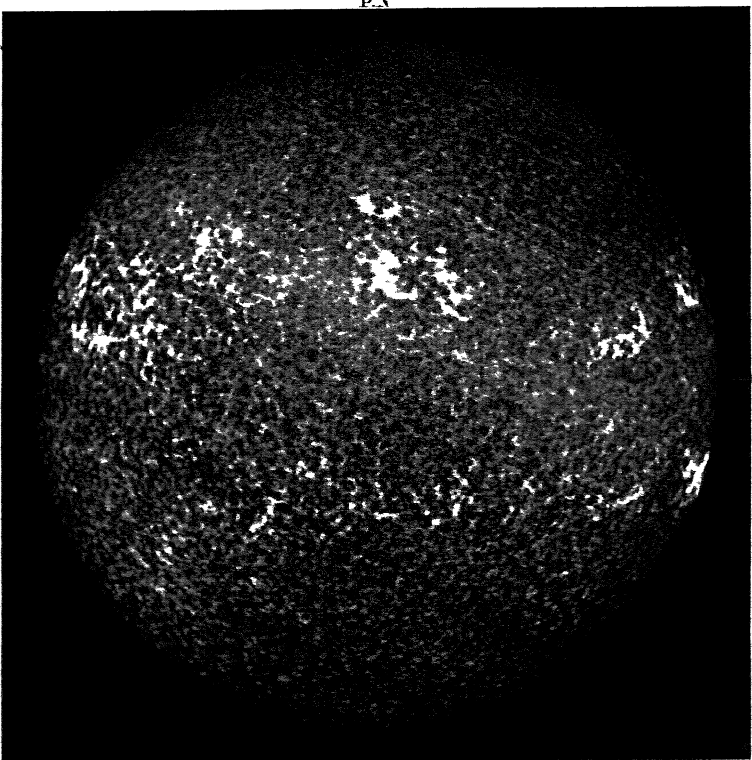
Helioq Dujardin

Appareils Enregistreurs de l'Atmosphère Solaire

Enregistrement des Formes

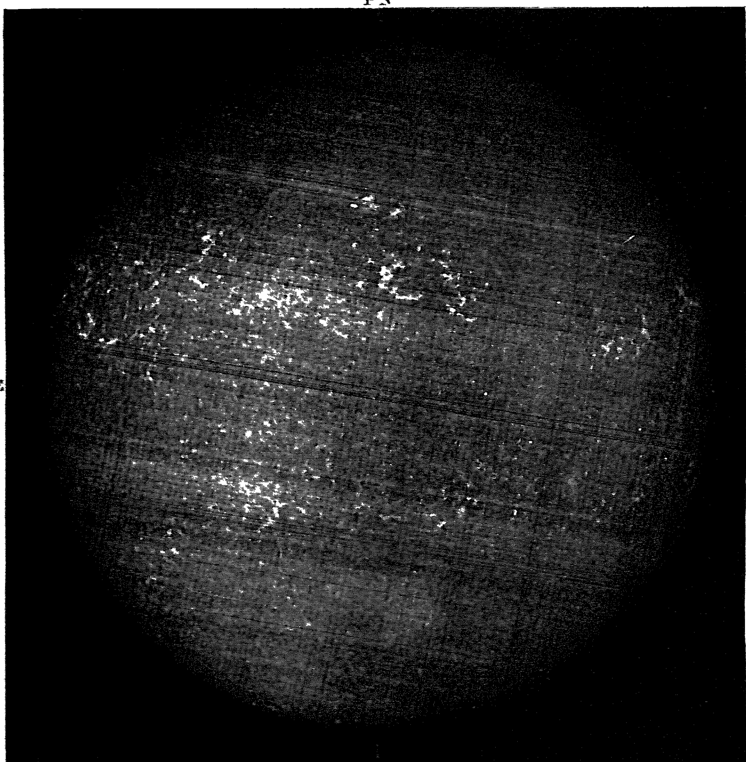
Comparaison entre l'image du calcium à raie brillante et l'image du carbone à raie noire

Case A
P.N



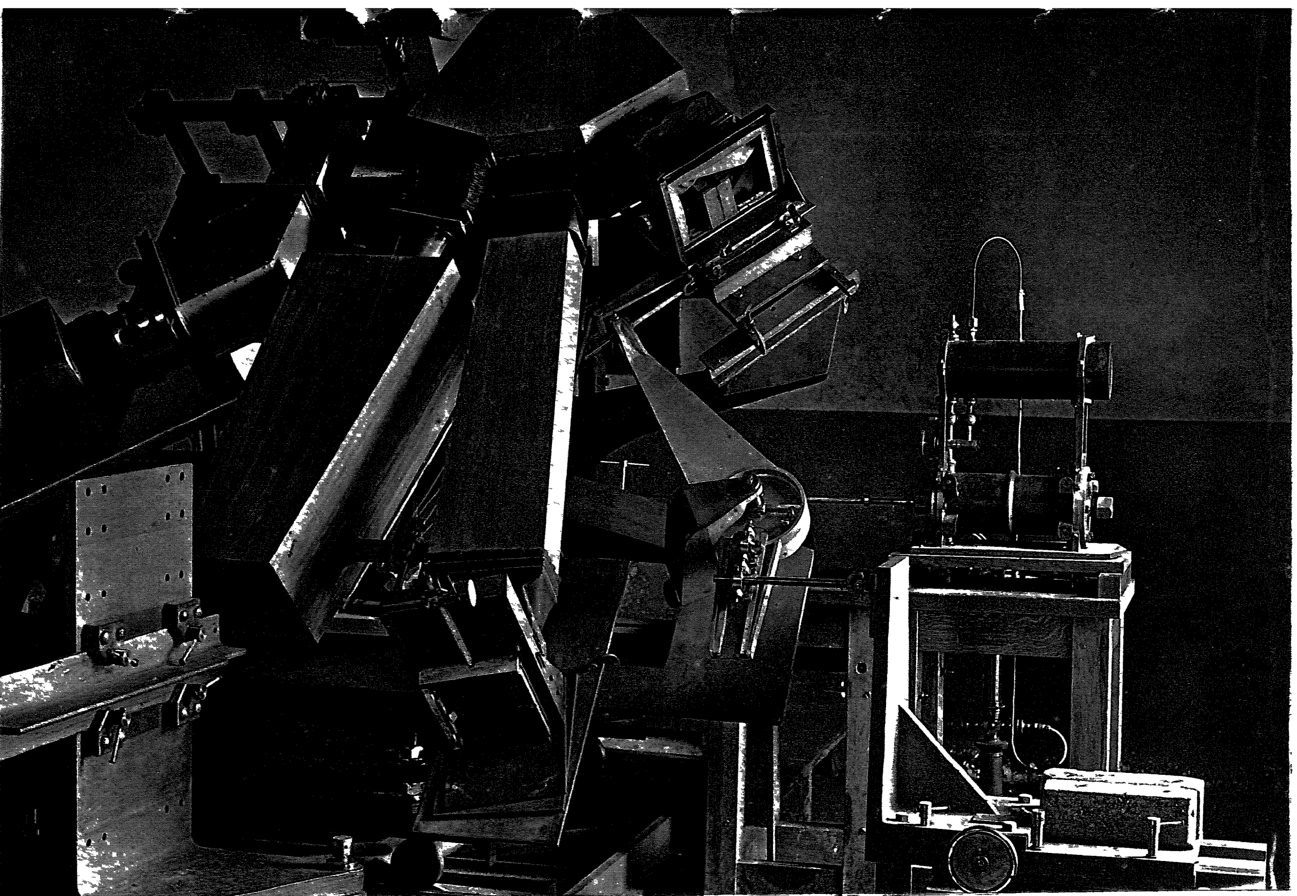
Case A – Image du Soleil chromosphère obtenue avec la raie K_2 du calcium et le spectrographe à un prisme le [illegible] Mai 19[illegible] de 8^h [illegible] à 8^h [illegible]^m Largeur de la seconde fente [illegible]

Case B
P.N



Case B – Image du Soleil couche renversante, obtenue avec la raie du carbone λ 3883,2 et le spectrographe à un prisme le [illegible] Mai 19[illegible] de 10^h [illegible]^m à 11^h [illegible]^m Largeur de la seconde fente [illegible]

Case C



Case C – Seconde disposition du spectrographe à réseau avec deux fentes seulement mais avec deux chambres. La chambre de droite, qui est à mouvements automatiques, est employée à l'enregistrement des formes et des vitesses radiales. La chambre centrale, qui exige l'aide de la main, assure l'enregistrement des spectres avec le mouvement discontinu.

Héliog et Imp Dujardin